

AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Tarmo Simonen

Tietokoneohjelman suunnittelu akustisen mittauksen opetukseen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytetyönä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoo, 7. toukokuuta, 2010

Valvoja:	Professori Vesa Välimäki
Ohjaaja:	Diplomi-insinööri Jussi Pekonen

Tekijä:	Tarmo Simonen	
Työn nimi:	Tietokoneohjelman suunnittelu akustisen mittauksen opetukseen	
Päivämäärä:	7.5.2010	Sivuja: 62
Tiedekunta:	Elektroniikka, tietoliikenne ja automaatio	
Professuuri:	S-89	
Työn valvoja:	Prof. Vesa Välimäki	
Työn ohjaaja:	DI Jussi Pekonen	
<p>Diplomityössä käydään läpi tietokoneohjelman suunnittelu akustisen mittauksen opetukseen. Ongelmaa tarkastellaan opiskelijan, opettajan ja opetusta tarjoavan yksikön infrastruktuurin näkökulmista. Erilaisia toteutustapoja tutkittiin, pohtien eri vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia. Opetukseen käytettävä ohjelmakokonaisuus toteutettiin hyödyntäen LabVIEW-kehitysympäristöä.</p> <p>Työssä tarkastellaan lyhyesti kaiutinmittausten teoriaa ja <i>Akustisen mittauksen harjoitustyö</i> -kurssilla vallitsevaa lähtötilannetta. Ohjelman kehitykseen LabVIEW-ympäristössä ja sen tuomiin mahdollisuuksiin ja ongelmakohtiin paneuduttiin. Ratkaisun tietoturvanäkökulmaan kiinnitettiin huomiota.</p> <p>Ohjelma otettiin käyttöön kevään 2010 kurssilla, jolta kerättiin opiskelijapalautetta. Toteutus todettiin pieniä kehitystoiveita lukuunottamatta onnistuneeksi. Diplomityö tarjoaa havainnollisen esimerkin LabVIEW-sovelluksen laatimisesta akustiikan opetus- ja tutkimuskäyttöön.</p>		
Avainsanat: LabVIEW-ohjelmointi, tietoturva, tietokoneavusteinen opetus, kaiutinmittaus		

Author:	Tarmo Simonen	
Name of the thesis:	Designing a Computer Program for The Education of Acoustic Measurements	
Date:	May 7, 2010	Number of pages: 62
Faculty:	Electronics, Communications and Automation	
Professorship:	S-89	
Supervisor:	Prof. Vesa Välimäki	
Instructor:	Jussi Pekonen, M.Sc.	
<p>This Master’s thesis studies the designing of a computer program for the education of acoustic measurements. The problem is discussed from the student’s, the teacher’s and the administrative organization’s point of view. Different ways to solve the problem were contemplated. The solution was realized by using LabVIEW development system.</p> <p>The thesis explains the theory behind loudspeaker measurements and introduces the situation at hand on the course <i>Exercise in Acoustical Measurements</i>. Software development using LabVIEW development system was closely examined, weighing the possibilities and problems. Data security of the system under development was also considered.</p> <p>Newly created software was deployed for the first time on the course in spring 2010. Course feedback was collected from the students. The feedback was mostly positive - only minor suggestions for development were given. This Master’s thesis offers the engineers, the teachers and the researchers an example of creating a measurement software by using graphical programming of LabVIEW development system.</p>		
Keywords: LabVIEW programming, data security, computer based education, loudspeaker measurement		

Kiitokset

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Teknillisen korkeakoulun signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle vuosina 2009 ja 2010. Haluaisin kiittää ennen kaikkea työn valvojaa professori Vesa Välimäkeä sekä ohjaajaa DI Jussi Pekosta asiantuntevasta avusta.

Myös koko laitoksen henkilökunnalle kuuluu kiitos kaikesta avusta matkan varrella, erityisesti sihteereille.

Kiitän vaimoani Niinaa kaikesta tuesta, jota olen saanut vuosien varrella ja tämän kirjoitustyön aikana.

Suurkiitokset vanhemmilleni Erkille ja Riitalle ja siskolleni Marja-Leenalle, jotka ovat tukenut minua koko opintojeni ajan.

Lisäksi kiitokset kaikille kavereilleni, jotka ovat auttaneet minua mitä erilaisemmin tavoin läpi opiskeluvuosien ja joiden nimiä en saisi mahtumaan tätä tarkoitusta varten varattuun tilaan.

Otaniemi, 7. toukokuuta, 2010

Tarmo Simonen

Sisältö

Lyhenteet	vi
Kuvat	viii
1 Johdanto	1
2 Akustiset mittaukset	4
2.1 Kaiutinmittaukset	7
2.2 Kaiutinmittauksen virhelähteet	9
3 Ohjelmiston kehittämisen lähtökohdat	10
3.1 Mittausjärjestelmä	10
3.2 Uuden ohjelmiston tarve	12
3.3 Ohjelmiston vaatimukset	13
3.4 Toteutuksen tienhaarat	13
3.5 Mittausohjelmia	14
4 Toteutus	20
4.1 Alustan valinta	22
4.2 LabVIEW	23
4.2.1 LabVIEW:n lisäosat	24
4.2.2 Virtuaali-instrumentti	24
4.3 Sovelluksen toteutus virtuaali-instrumenttina	25

4.3.1	Käyttöliittymä	25
4.3.2	Mittauksen alustus	27
4.3.3	Magnitudi- ja impulssivasteet	27
4.3.4	Vasteiden analysointi	30
4.3.5	Herkkyys	34
4.3.6	Kokonaissärö, THD	34
4.3.7	Raportti	36
4.4	Työohjeet	37
4.5	Tietoturva ja järjestelmän ylläpito	37
5	Testaus ja huomiot	39
5.1	Testijärjestely	39
5.2	Huomiot ja palaute	39
5.3	Kehityskohteet	40
6	Yhteenveto	42
6.1	Ratkaisun yleispätevyys	43
A	Kysymykset	46
B	Mittausraportti	48
C	Opiskelijoiden antamaa palautetta mittausohjelmasta	52

Lyhenteet ja symbolit

AD	Analog to Digital
AP	Audio Precision
ATK	Automaattinen tietojen käsittely
CD	Compact Disc
DA	Digital to Analog
EPS	Encapsulated PostScript
ETA	Elektroniikan, tietojenkäsittelyn ja automaation tiedekunta
EXE	Executable
FFT	Fast Fourier Transform
HTML	Hyper Text Markup Language
I/O	Input / Output
LV	LabVIEW
NI	National Instruments
PC	Personal Computer
RMS	Root Mean Square
RPM	RPM Packet Manager
THD	Total Harmonic Distortion
VI	Virtual Instrument
WAV	Waveform Audio File Format
WWW	World Wide Web
$h(\tau)$	Impulssivaste
$x(t)$	Tulosuure
$y(t)$	Lähtösuure
P	Teho
R	Resistanssi
C	Kapasitanssi
U	Jännite

Kuvat

2.1	Kondensaattorimikrofonin rakenne [1]	5
2.2	Kondensaattorimikrofonin ja esivahvistimen sijaiskytkentä [1]	5
2.3	Musta laatikko	6
2.4	Kaiuttimen rakenne [2]	7
3.1	Mittausjärjestelmä	11
3.2	WinMLS 2004	15
3.3	FuzzMeasure	16
3.4	Audacity	17
3.5	MATLAB	18
3.6	LabVIEW	19
4.1	Kaiutinmittausohjelman käyttöliittymä	26
4.2	Lohkokaavion Case Structure -komponentti [3]	26
4.3	Aloitussivu	27
4.4	Herätefunktio MathScript -ikkunassa	28
4.5	Dekonvoluutio VI [3]	28
4.6	Taajuuskeskiarvoistuksen toteutus lohkokaavion komponenteilla	30
4.7	Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta suoraan edestä päin mitattuna	31
4.8	Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta 60 asteen kulmasta mitattuna	31
4.9	Heijastavan levyn tapaus	32

4.10	Impulssivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta heijastavan levyn tapauksessa	32
4.11	Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta heijastavan levyn tapauksessa	33
4.12	Herkkyysmittaukseen käytettävä laitteisto	33
4.13	Näkymä särömittauksesta	35
4.14	LabVIEW: Harmonic Distortion Analyzer	36
4.15	New Report VI	36
4.16	Append Front Panel Image to Report VI	37

Luku 1

Johdanto

Nopea tietojenkäsittelyn kehittyminen loi 80-90-lukujen taitteessa paljon innovaatioita, joissa tietotekniikkaa käytettiin hyödyksi. Käyttöjärjestelmät ja kehitysympäristöt olivat suuritöisiä ja kaikki piti ohjelmoida alimmalla tasolla, alusta asti. Yhtä sovellusta varten ohjelmoitiin suurehko ohjelma, joka oli sidoksissa käytettyyn alustaan. Vielä tänäkin päivänä näkee usein tietokonelaitteita ja ohjelmia, jotka on luotu parikymmentä vuotta sitten. Historian siipien havinaa voi kuulla useassakin kohteessa, esimerkkeinä yritysten taloushallinto, julkisten palveluiden tietokannat ja erikoiset tutkimusprojektit. Opetuskäyttöönkin tehtiin tietokoneohjelmia, jotta opiskelijat pystyisivät suorittamaan harjoitustöitä tietokoneavusteisesti.

Myös Teknillisessä korkeakoulussa akustiikan opetukseen käytetty tietokonelaitteisto, joka on ollut käytössä *Akustisen mittauksen harjoitustyö* -kurssilla, on päässyt vanhenemaan. Tähän saakka hyvin palvellut ohjelma on kymmenen vuoden takaa ja ohjelmoitu käyttäen kehitysympäristöjä, joille ei ole enää nykyaikaisilla käyttöjärjestelmillä kunnollista tukea. Tänä päivänä on vaikea löytää osaavia henkilöitä jatkokehittämään vanhalle alustalla rakennettua ohjelmaa. Kun vanhentunut tietokonelaite hajoaa, on etsittävä kyseiseen laitteeseen käyviä osia, koska kyseiselle alustalle kehitettyä ohjelmaa ei saa toimimaan uudemmissa koneissa.

2000-luvun suurimpia tietojenkäsittelyn buumeja ovat alustariippumattomat sovellukset. Näinä aikoina, kun tietokoneraudan elinkaari on lyhyt, on yhä tärkeämpää saada ohjelmat toimimaan koneessa kuin koneessa. Useimmat sovellukset toimivatkin esimerkiksi verkossa, jolloin käyttäjärajapintana toimii WWW-selain.

Akustisen mittauksen opetukseen tarvitaan uusi sovellus. Tarkoituksena on välttää yksinomaan yhtä käyttötarkoitusta varten tehtävää suuritöistä ohjelmointia, sillä ongelma ei ole todellisuudessa niin erikoinen, että se sitä edellyttäisi.

Mittaukset itsessään on mahdollista toteuttaa melkein millä tahansa audio-ohjelmalla.

Internet on pullollaan ilmaisia ohjelmia, jotka kykenevät luomaan herätesignaalia ja tallentamaan mitattua vastetta. Myöskin FFT (*Fast Fourier Transform*) sisältyy useimpiin ohjelmiin ja taajuusvasteet saadaan helposti tulostettua. Harrastelija-akustiikolle on tarjolla edullisia ohjelmia erityisesti kaiutin- ja huonemittauksiin. Opetuskäyttöön tarvitaan mielellään ohjelma, joka myös opastaa opiskelijoita ja kerää opiskelijoiden vastaukset yhdessä mittaustulosten kanssa yhdeksi loppuraportiksi.

Nykyisillä ylemmän tason ohjelmointiympäristöillä on kätevä integroida nämä ominaisuudet havainnolliseksi käyttöliittymäksi, eikä opiskelijoiden aikaa tuhlaannu ohjelmiston valikoissa seikkailuun. National Instruments:n LabVIEW on ollut jo vuosia Mittaustekniikan ryhmän käytössä. LabVIEW on suunniteltu nimenomaan mittaus- ja automaatiosoveluksiin ja on täysin ohjelmitava graafinen kehitysympäristö.

Tässä työssä perehdytään tietokoneohjelman suunnitteluun opetuskäyttöä varten tarkastellen asiaa opiskelijan, opettajan, ylläpidon ja resurssien näkökulmista. Työssä paneudutaan toteutukseen perinpohjaisesti, valottaen esimerkein vastaantulleita ongelmia ja niiden ratkaisuja. Työn pääasiallisena tavoitteena on toteuttaa uusi kaiutinmittausohjelma Akustisen mittauksen harjoitustyö -kurssille. Samanaikaisesti pyritään tarjoamaan esimerkki, kuinka LabVIEW-kehitysympäristöä hyväksikäyttäen laaditaan mittaussovellus kaikkien osapuolten tarpeet huomioonottaen mihin tahansa opetus- tai tutkimuskäyttöön. Tarkoituksena on antaa kuvaus LabVIEW:n tarjoamista mahdollisuuksista ja toiminnoista sillä tarkkuudella, että vaila aiempaa LabVIEW-ohjelmointikokemusta oleva henkilö, kuten allekirjoittanut työn aloitushetkellä, uskaltaa tarttua ohjelmaan kehittääkseen itselleen, tutkimusryhmälleen tai ylläpitämälleen kurssille sovelluksen. Työn ei ole tarkoitus kuitenkaan toimia ohjekirjana LV-ohjelmointiin, ainoastaan asiaa valottavana esimerkkinä.

Työssä pyritään antamaan myös kokonaiskuva siitä, miten sovelluksen laadinta, toteutus, kehitys ja ylläpito vaikuttavat yksikön infrastruktuuriin Aalto-yliopiston Teknillisessä korkeakoulussa. Työ tehdään signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle.

Tänä päivänä kun laitokset ja yliopistotkin fuusioituvat, töiden kokonaiskuva muuttuu. Organisaatiot kasvavat ja toimintamalleja joudutaan viilaamaan yleispätevimiksi. Pienissä yksiköissä oli, ja on edelleen, mahdollisuus „nyrkipajamaiseen” puuhasteluun. Useisiin ongelmiin voidaan löytää yksilöllinen ratkaisu, ovathan ongelmatkin hyvin kertaluonteisia. Suurempien organisaatioiden infrastruktuuri vaatii esimerkiksi laitekannan yhtenäistämistä jouhevamman ylläpidon takaamiseksi. Käyttöjärjestelmille pyritään asentamaan päivitykset automaattisesti, eikä jokaista mittausjärjestelmää ehditä joka viikko pelastamaan.

Yksi tärkeimmistä tietotekniikan äärellä tapahtuvaa toimintaa määräävistä tekijöistä nykyaikana on tietoturva. Viimeisen kymmenen vuoden aikana puhekieleen päätynyt termi työllistää nykyisin suurinta osaa ennen niin kutsutuista *mikrotukihenkilöistä*. Kun mikrotukihenkilö ennen vanhaan käytti päivänsä rakentamalla tietokoneen jämistä uuden palveli-

men, juomalla kahvia, juottamalla emolevylle pari vanhentunutta kondensaattoria ja buuttaamalla kaatuneen koneen, nykyään aika kuluu tietoturvatiedotteita lukiessa, reikiä paikkaillessa ja patistellessa käyttäjiä käyttämään vahvempia salasanoja. Myös yksityisyyden suojaan kiinnitetään parempaa huomiota.

Aivan aluksi perehdytään luvussa 2 akustisten mittausten teoriaan lähinnä kaiutinmittausten osalta, jonka jälkeen luvussa 3 käydään läpi Akustisen mittauksen harjoitustyö-kurssilla vallitsevan lähtötilanteen. Samalla tutustutaan erilaisiin ohjelmistoihin, joiden soveltuvuutta tähän tehtävään haluttiin tutkia. Luku 4 käsittelee tehtyjä ratkaisuja lähtien valinnan perusteluista, käyden läpi toteutuksen yksityiskohtia ja esittäen suunnitelman tietoturvallisen opetusohjelman ylläpidosta. Lopuksi käydään läpi toteutuksen testaaminen ja puretaan opiskelijoilta saatua palautetta tehden kehityssuunnitelmia seuraavaa kurssia varten.

Luku 2

Akustiset mittaukset

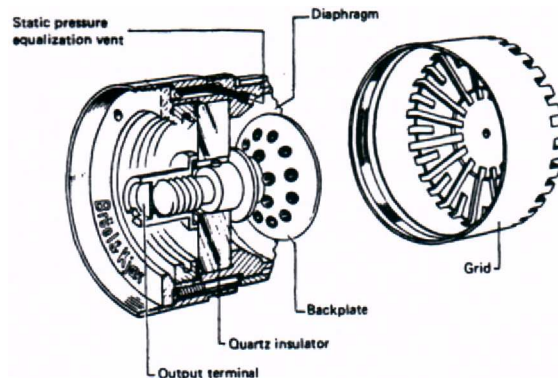
Akustiset mittaukset voidaan jakaa karkeasti *äänitasomittauksiin*, *äänitehomittauksiin* sekä *järjestelmävastemittauksiin*. *Akustisen mittauksen harjoitustyö* -kurssilla opiskelijat toteuttavat kaiutinmittauksen, joka kuuluu järjestelmävastemittauksiin. Tässä luvussa tarkastellaan kaiutinmittauksiin liittyvää teoriaa.

Tila

Testiympäristö on kriittinen tekijä kaiutinmittauksia tehtäessä. Hyvä testiympäristö on hiljainen ja heijastuksista vapaa. Akustiset mittaukset ovat luonteeltaan sellaisia, että missä tahansa tilassa tehdyissä mittauksissa heijastukset vaikuttavat mittaustulokseen. Vapaakentällä tarkoitetaan sellaista ideaalista mittaussympäristöä, jossa ei olisi mitään materiaalia aiheuttamassa heijastuksia. Lähellä ideaalista vapaakenttää olisi ulkoilmassa tarpeeksi korkealla maan pinnasta suoritettu mittaustila. Tällöin ulkoilman ominaisuudet, kuten taustamelu ja sää, vaikeuttavat mittausta. Koska täydellistä vapaakenttää on mahdoton saavuttaa, käytetään mittauksissa usein niin kutsuttua kaiutonta huonetta. Kaiuton huone on akustisiin mittauksiin tarkoitettu tila, jossa esimerkiksi valtavilla kiilamaisilla absorbereilla on pyritty minimoimaan huoneen heijastukset. Tarpeeksi pieniä taajuuksia mitattaessa tulee kuitenkin aina raja vastaan. Huoneen dimensioiden suuruudella tapahtuvaa resonointia ei koskaan voida kokonaan välttää.

Mittalaitteet

Yleisesti käytetyin anturi kaiutinmittauksissa on kondensaattorimikrofoni. Kondensaattorin etulevynä toimiva jännitetty kalvo liikkuu äänenpaineen vaikutuksesta aiheuttaen mikrofoniin muuttuvan kapasitanssin. Etulevyn ja kiinteän takalevyn väliin kytketään polarisatiojännite (kuva 2.1).

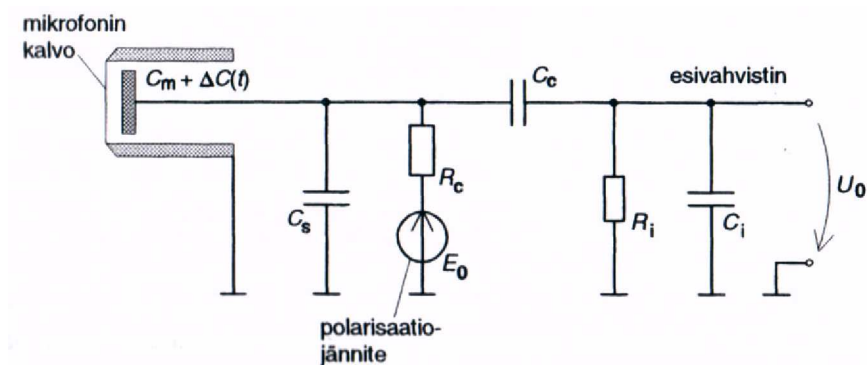


Kuva 2.1: Kondensaattorimikrofonin rakenne [1]

Muuttuvan kapasitanssin aiheuttama jännite vahvistetaan mikrofonin omassa esivahvistimessa, josta signaali jatkaa matkaansa kaapelia pitkin varsinaiselle mittausvahvistimelle. Mikrofonin ja esivahvistimen sisjaiskytkentä on esitetty kuvassa 2.2 ja sen lähtöjännite on

$$U_0(t) = \frac{\Delta C(t)}{C} E_0 \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \quad (2.1)$$

missä E_0 on polarisaatiojännite, $\Delta C(t)$ on äänipaineen aiheuttama vaihtelu kapasitanssissa ja $C = C_m + C_s + C_i$ [1].



Kuva 2.2: Kondensaattorimikrofonin ja esivahvistimen sijaiskytkentä [1]

Muita mittaukseen käytettäviä laitteita ovat mikrofonivahvistin, jolla vahvistetaan mikrofonin tuottama signaali helpommin mitattavalle tasolle; päätevahvistin, jolla linjatasoinen syötesignaali vahvistetaan kaiutinta ajavaksi suuritehoiseksi jännitteeksi; sekä audio-interface (tai äänikortti), joka muuntaa jännitesignaalin tietokoneen ymmärtämään muotoon ja päin vastoin. Lisäksi tarvitaan joukko kytkentään soveltuvia kaapeleita ja liittimiä.

Näytteistys

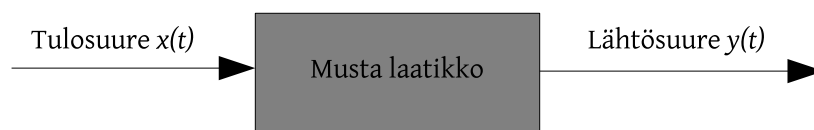
Jotta mitattu jatkuva signaali saadaan digitaaliseen muotoon tietokoneelle, signaalille on tehtävä AD-muunnos (*Analog to Digital*). Näytteistys asettaa rajat signaalin korkeimmalle mahdolliselle taajuudelle ja dynamiikalle. Nyquistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksinkertainen näytteistettävän signaalin taajuuteen nähden. Sitä suuremmat taajuudet suodatetaan pois laskostumisen estämiseksi. Kun digitaalinen signaali halutaan ulos tietokoneesta käytetään DA-muunnosta (*Digital to Analog*). Dynamiikkaa rajoittaa näytteen pituus, eli montako bittiä käytetään yhden näytearvon kuvaamiseen. CD-levyllä musiikki on tallennettu resoluutiolla 16 bittiä, 44100 Hz. Tämä mahdollistaa noin 20000 Hz signaalitaajuuden (ihmisen kuuloalue) ja 96 dB dynamiikan. Tarkemmin näytteistykseen liittyvään teoriaan voi perehtyä viitteistä [4], [2].

Lineaariset ja aikainvariantit järjestelmät

Akustinen järjestelmä voidaan esittää mustana laatikkona (kuva 2.3). Laatikko kuvaa järjestelmän tulosuureen ja lähtösuureen välistä riippuvuutta, järjestelmävastetta. Kun tarkastellaan säröytymätöntä (lineaarista) sekä ajassa muuttumatonta (aikainvarianttia) tapausta, järjestelmän ominaisuuksia kuvaa täydellisesti impulssivastefunktio $h(\tau)$. Tällöin tulosuureen $x(t)$ ja lähtösuureen $y(t)$ välillä pätee

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (2.2)$$

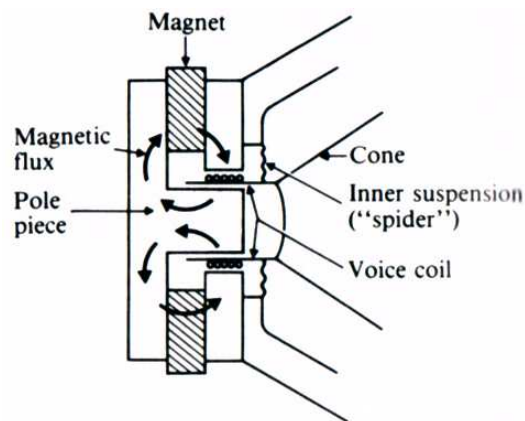
missä τ on integroinnin apusuure, liukuva viive. Lisää teoriaa löytyy lähdekirjallisuudesta [1] ja [4].



Kuva 2.3: Musta laatikko

2.1 Kaiutinmittaukset

Kaiutin on elektromagneettinen muunnin, joka muuntaa sähköisen tehon ääneksi. Dynaaminen kaiutin koostuu puhekelasta (*voice coil*), kartiosta (*cone*) ja kestopagneetista (kuva 2.4). Kun puhekelaan ajetaan sähkövirtaa, virran tuottama muuttuva magneettikenttä aiheuttaa voiman suhteessa kaiuttimen kestopagneettiin. Voima liikuttaa puhekela, johon kartio on kiinnitetty. Liikkuva kartio puolestaan liikuttaa ilmaa, joka tuottaa ääntä.



Kuva 2.4: Kaiuttimen rakenne [2]

Kaiutin voi olla myös monielementtinen. Signaali jaetaan jakosuotimella kahteen tai useampaan kaistaan ja eri taajuuskaistojen toistoon käytetään erillisiä elementtejä. Lisää kaiutintyyppäjä ja toimintaperiaatteita löytyy viitteistä [2] ja [5].

Kaiuttimen testaaminen vaikuttaa teorian puitteissa hyvin yksinkertaiselta. Objektivisten mittareiden ohella tarvitaan kuitenkin myös subjektiivisia kokeita, jotka lopulta määrittävät kaiuttimen laadun. Vasta kuuntelukokeet paljastavat, toimiiko kaiutin halutulla tavalla käyttöympäristössään. Akustisen mittaustekniikan kurssilla jätämme tarkastelun ulkopuolelle kuuntelukokeet, sillä opiskelijoiden on määrä perehtyä teknisten ominaisuuksien mittaamiseen. Seuraavaksi tarkastelemme kaiuttimille suoritettavia objektiivisia testejä [5].

Kaiuttimen impulssivaste

Impulssivasteen $h(\tau)$ (yhtälö 2.2) selvittämiseksi luodaan tulosignaali $x(t)$ eli *heräte*. Heräte kattaa koko mitattavan taajuuskaistan, ja on luonteeltaan sellainen, ettei se vahingoita mittalaitteita tai mitattavaa kaiutinta. Tyypillisiä herätteitä ovat sinipyyhkäisy ja laajakaistaiset kohinat, jotka kattavat testattavan kaistan (20 Hz - 20 kHz). Tunnettu heräte syötetään mitattavaan kaiuttimeen, jonka lähtösignaali $y(t)$, eli *vaste*, mitataan kaiuttimen eteen sijoitetulla mikrofoniin ja tallennetaan tietokoneelle. Kun heräte ja vaste tunnetaan, saadaan ratkaistua

impulssivaste.

Kun konvoluutiointegraalille 2.2 tehdään Fourier-muunnos [4], saadaan integraali korvattua kertolaskulla

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (2.3)$$

Tästä saadaan ratkaistua taajuusvaste yksinkertaisesti dekonvoluution sijaan jakolaskulla

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (2.4)$$

Impulssivaste ratkeaa numeerisesti käänteisellä Fourier-muunnoksella, mutta usein taajuusvastefunktio riittää kuvaamaan järjestelmän ominaisuuksia [1].

Magnitudivaste

Magnitudivaste, eli taajuusvastefunktion itseisarvo $|H(f)|$, kuvaa audiolaitteen ominaisuuksia hyvin, sillä ihmisen kuulo havaitsee huonosti vaiheinformaatiota. Vaste mitataan kaiuttomassa huoneessa suoraan kaiuttimen edestä, sekä useista kulmista. Näin saadaan selville myös kaiuttimen suuntaavuus eri taajuuksilla. Magnitudivaste kuvataan desibeleinä logaritmisella taajuusasteikolla.

Floyd E. Toole on tutkinut kuuntelukokeiden ja kaiutinmittausten välistä yhteyttä [6], [7]. On pystytty osoittamaan, että nimenomaan 0, 30 ja 60 asteen kulmista tehdyillä vastemittauksilla on vahva yhteys kuuntelukokeissa saatuihin tuloksiin.

Herkkyys

Kaiuttimen herkkyys määritellään siten, kuinka suuri akustinen teho saadaan tuotettua sisään syötetyllä yhden watin sähköteholla. Kaiuttimen impedanssi riippuu vahvasti taajuudesta. Valmistaja ilmoittaa kaiuttimen nimellisimpedanssin, joka kuvaa kaiuttimen impedanssia keskimäärin 1 kHz taajuudella. Yleinen kaiuttimen nimellisimpedanssi on 8Ω . Tällöin Ohmin lain, $U = RI$, ja sähkötehon yhtälön, $P = UI$, avulla saadaan ratkaistua $P = U^2/R$, joten kaiuttimeen syötetään $2.83 \text{ V}_{\text{RMS}}$ taajuudella 1 kHz.

Akustinen teho mitataan mikrofonilla määritelmän mukaan suoraan kaiuttimen edestä yhden metrin päästä. Kun mikrofonin herkkyys tunnetaan, saadaan mikrofonin ulostulojännitteestä laskettua akustinen teho.

Kokonaissärö

Järjestelmän harmoninen kokonaissärö (Total harmonic distortion, THD) on helpoin ja yleisin tapa kertoa kuinka paljon mitattava järjestelmä tuottaa säröä [8]. Järjestelmään syötetään

yhtä pistetaajuutta, eli puhdasta siniaaltoja. Mikäli järjestelmässä esiintyy epälineaarisuutta, ulostuleva aaltomuoto vääristyy siten, että uusia sinikomponentteja (harmonisia) syntyy. Ulostulevan signaalin taajuusanalyysistä mitataan muodostuneiden harmonisten ja perustaajuden arvot. Kokonaissärö lasketaan särökomponenttien ja perustaajuuden neliösummien suhdelukuna ja ilmoitetaan prosentteina.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} * 100 \quad (2.5)$$

missä $V_2 \dots V_n$ ovat muodostuneet särökomponentit ja V_1 on perustaajuus.

THD:n määritelmässä eri lähteiden välillä on poikkeavuuksia. Jotkut lähteet määrittävät THD:n laskentatavaksi [9]:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}} * 100 \quad (2.6)$$

2.2 Kaiutinmittauksen virhelähteet

Kaiutinmittauksiin virhettä aiheuttavat kaikki mittaukseen osallistuvat osatekijät. Suurta tarkkuutta vaativissa mittauksissa virheitä voidaan kompensoida esimerkiksi huomioimalla mikrofonin taajuusvaste jakamalla mitatun järjestelmän vaste mikrofonin vasteella taajuustasossa. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota mittausohjelmaan ja käyttäjään.

Kaiutinmittauksen virhelähteet:

- mittaustila
- mikrofoni
- päätevahvistin
- mikrofonivahvistin
- kaapelit ja liittimet
- AD/DA muuntimet
- mittausohjelma
- käyttäjä eli mittauksen suorittaja

Luku 3

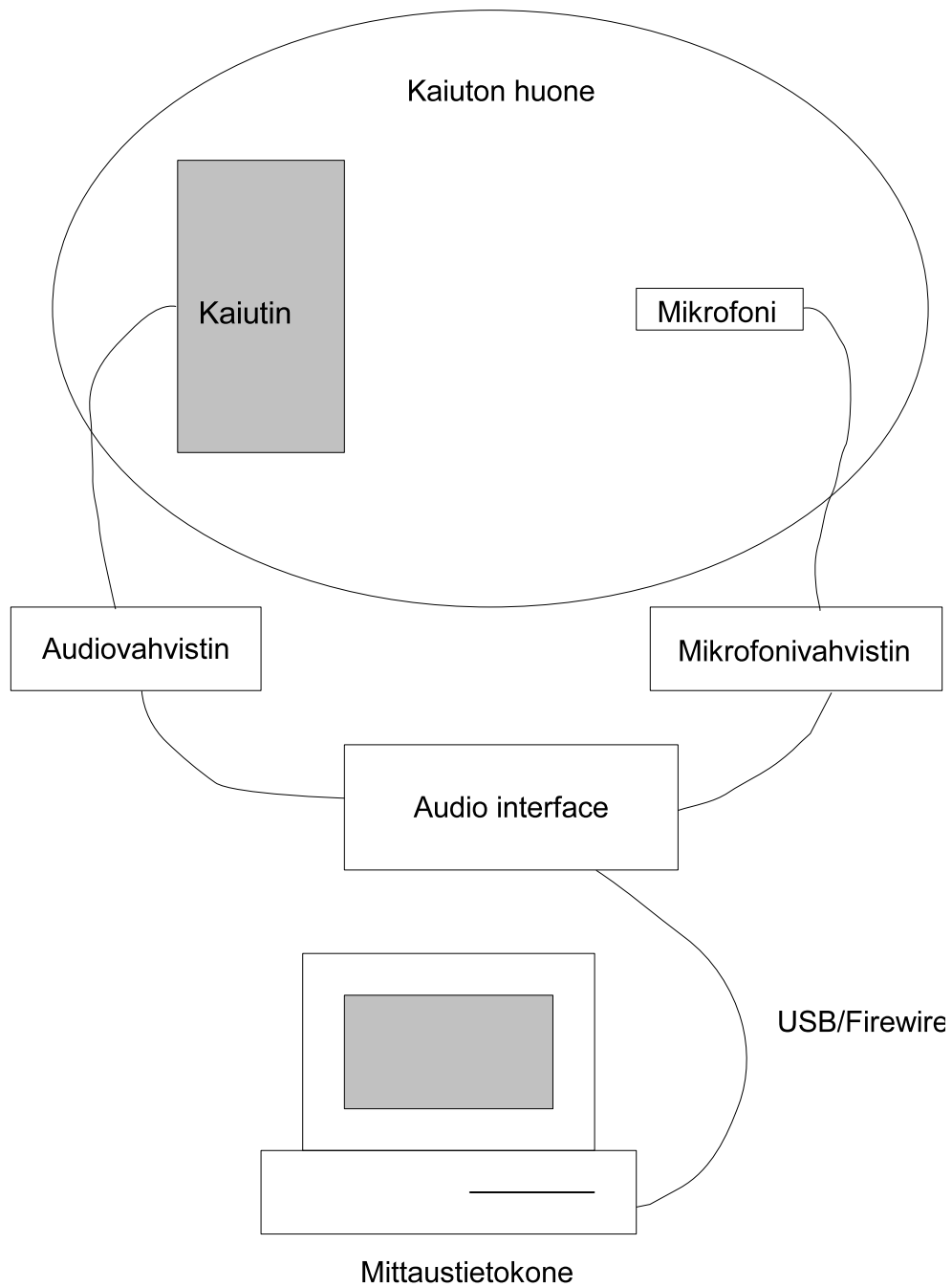
Ohjelmiston kehittämisen lähtökohdat

Aalto-yliopiston Teknillisen korkeakoulun signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos tarjoaa opiskelijoille kurssia *S-89.3330 Akustisen mittauksen harjoitustyö*. Kurssin on tarkoitus antaa opiskelijoille perustiedot akustisten mittausten suorittamisesta. Opiskelijat perehtyvät itsenäisesti teoriaan kirjallisuudesta, jonka jälkeen he suorittavat harjoitustyön pareittain. Harjoitustyö suoritetaan akustiikan tutkimusryhmän suuressa kaiuttomassa huoneessa, jossa he mittaavan joko omaansa tai kurssin tarjoamaa kaiutinta. Kukin pari varaa yhden vuoron mittausten suorittamiselle.

3.1 Mittausjärjestelmä

Mitattava kaiutin ja mikrofoni sijoitetaan kaiuttomaan huoneeseen. Kaiutin asetetaan jalustalle keskelle huonetta ja mikrofoni suunnataan suoraan kohti kaiutinelementtiä. Mikrofonin ja kaiutinelementin välinen etäisyys magnitudivastemittauksissa tulee olla 2 metriä, herkkyysmittauksissa 1 metri. Vahvistimet ja mittaustietokone ovat tarkkailutilassa. Assistentti on kytkenyt laitteiston valmiiksi opiskelijoita varten. Opiskelijat itse säätävät kaiuttimen ja mikrofonin välistä etäisyyttä ja mittauskulmaa mittauksen edetessä. Pääosa työskentelyyn kuluva ajasta tapahtuu mittausohjelman parissa. Mittauksiin kuuluu taajuusvasteen mitaus suoraan edestä, 30° :n ja 60° :n kulmista kaiuttimen on-axis-linjaan nähden, sekä suoraan edestäpäin vanerilevy verkolla tuottamassa heijastuksia mittaukseen. Lisäksi mitataan kaiuttimen herkkyys- ja säröominaisuudet. Jokaiseen mittaukseen liittyy kysymyksiä, joihin opiskelijat vastaavat. Lopuksi vastauksista ja mittaustuloksista koostetaan loppuraportti, jonka kurssin opetushenkilö arvostelee.

Kuvassa [3.1](#) on esitetty käytössä oleva mittausjärjestelmä. Tietokoneella luodaan mit-



Kuva 3.1: Mittausjärjestelmä

taukseen tarvittavat herätesignaalit. Signaali ohjataan audiovahvistimelle *Yamaha Natural Sound Stereo Power Amplifier MX-70*, jolla ajetaan kaiuttomassa huoneessa sijaitsevaa mitattavaa kaiutinta. Mittamikrofonina käytetään *Brüel&Kjær*:n kondensaattorimikrofonia 4133 -kapselilla. Mikrofonisignaali tuodaan kaapelilla kaiuttoman huoneen seinän läpi takaisin tarkkailutilaan mittausvahvistimelle. Mittausvahvistimena toimii *B&K Measuring Amplifier Type 2636*. Vahvistin tuottaa myös kondensaattorimikrofonin tarvitseman polarisaatiojännitteen. Vahvistimen ulostulo ohjataan tietokoneen äänikortille.

TKK:n ison kaiuttoman huoneen tasainen vaste ulottuu alapäässään 50 Hz:n paikkeille. Korkeammilla taajuuksilla huonetta voidaan käsitellä vapaakenttänä. Mittamikrofonin taajuusvaste on erittäin tasainen, samoin mittauksessa käytettävien vahvistimien. Valmistajien data-lehtien mukaan sekä mikrofonivahvistimen että päätevahvistimen THD on mitätön kaiuttimille tyypillisiin arvoihin verratuna. Näin ollen voimme jättää huomioimatta olemassa olevan laitteiston vaikutuksen mittauksista tässä yhteydessä. Tila on ainoa tekijä, joka mittauksen suorittajan täytyy mahdollisesti ottaa huomioon matalilla taajuuksilla tuloksia analysoitaessa.

Mittausohjelman ja audio-interfacen vaikutuksia arvioimme luvussa 4.

3.2 Uuden ohjelmiston tarve

Kurssilla käytetty mittaussovellus, *Simple Loudspeaker Measuring Program* [10], on ollut käytössä jo kymmenisen vuotta. Sovellus on ohjelmoitu Lisp-ohjelmointikielellä ja se perustuu QuickSig-ympäristöön. Ohjelma on hyvin toteutettu ja palvellut kurssia pitkään. Ongelmaksi tänä päivänä muodostuu se, että kyseistä ympäristöä tukee ainoastaan Apple Macintosh OS9, joka on vanhentunut käyttöjärjestelmä. Niin kauan kuin vanha alusta toimii, ohjelmaa voidaan käyttää. Jos laitteisto ikääntyessään hajoaa, ei varaosia tai korvaavaa alustaa enää löydy, eikä ohjelman siirto uudelle alustalle ole mahdollista. Myöskään vanhentunutta käyttöjärjestelmää ei saa kytkeä verkkoon sen aiheuttaman tietoturvariskin vuoksi.

Opiskelijapalautteen mukaan vanhassa mittausohjelmassa on joitain puutteita [11]. Perustoimintoja, kuten mittauksien selailua, on alettu kaivata. Opiskelijat ovat tottuneet käyttämään moderneja sovelluksia ja vaativat ohjelmalta tietynlaista käytettävyyttä. Opiskelijat ovat myös toivoneet, että mittausjärjestelmässä käytettäisiin jotain todellista mittausohjelmaa, jolla myös ammattimaisia mittauksia voitaisiin suorittaa. Näin saataisiin parempi yhteys käytäntöön.

Osa opiskelijoista mittaa kurssilla omaa kaiutinta. Tässä valossa olisi hyödyllistä saada helposti tallennettua mittausdata impulssivasteen muodossa opiskelijalle mukaan jatkotutkiskelua varten.

3.3 Ohjelmiston vaatimukset

Kurssin tavoitteena on antaa opiskelijoille käsitys akustisen mittauksen toteuttamisesta käytännössä. Opiskelijoiden on pystyttävä toteuttamaan mittaukset mahdollisimman pitkälle omaaloitteisesti. Tämä asettaa työohjeille ja mittausohjelmalle tietyt vaatimukset. Opiskelijoiden on tarkoitus keskittyä akustisen mittauksen tekemiseen, joten mittausohjelman käytön opiskelulle ei ole aikaa. Ohjelmiston on kyettävä ohjaamaan mittauksien kulkua, keräämään mittausdataa ja tekemään tuloksista raportti automaattisesti. Opiskelijoiden tulisi saada mittausdata, kuten impulssivaste-tiedostot, halutessaan mukaansa. Opetushenkilöstön työn helpottamiseksi on tärkeää, että ohjelmisto kykenee keräämään loppuselostustehtävien vastaukset samaiseen raporttiin mittausdatan kanssa.

Ohjelmiston on täytettävä myös tietyt tietoturva-vaatimukset. Kone on kytkettävä verkkoon varmuuskopiointia, raporttien tulostusta sekä tiedonhakua varten. Käyttöjärjestelmää tulee pystyä päivittämään ja itse mittauskone pitää pystyä vaihtamaan helposti mahdollisen laitteistovian sattuessa.

3.4 Toteutuksen tienhaarat

Aikaisemmissa kappaleissa on käytetty termejä *ohjelma* ja *ohjelmisto*. Ohjelmalla tarkoitetaan yksittäistä sovellusta, jolla suoritetaan tiettyä toimintoa, esimerkkinä tekstinkäsittely-ohjelma. Ohjelmisto puolestaan kuvaa joukkoa ohjelmia, joilla yhdessä toteutetaan työn vaatimaa kokonaisuutta. Esimerkiksi toimisto-ohjelmisto pitää sisällään tekstinkäsittelyn, taulokkolaskennan ja esitysgrafiikkasovelluksen. Akustisen mittauksen opetukseen käytettävä ohjelmisto voi siis pitää sisällään useita ohjelmia. Harjoitustyön suorittamisen kannalta ohjelmistolta vaaditaan seuraavanlaisia toimintoja: teorian ja työohjeiden esitys, mittauksen toteutus, tulosten esitys, kysymysten asettelu, vastausten keräys ja raportin koostaminen.

Mittausohjelmaa valittaessa on siis huomioitava mitä ylläolevista ominaisuuksista on mahdollista toteuttaa mittausohjelmalla itsellään ja mitkä ominaisuudet on toteutettava jollain toisella ohjelmalla. Yksinkertaisin tapa lähteä purkamaan ongelmaa olisi valita joukko valmiita ohjelmia. Työohjeet voidaan lukea selaimella HTML-tiedostosta ja vastaukset voidaan kerätä esimerkiksi HTML-lomaketta käyttäen. Mittausohjelman lisäksi opiskelijalla olisi siis käytössään esimerkiksi WWW-selain. Tällaisen ratkaisun hyviä puolia on toteutuksen helppous ja toiminnan vakaus. Yksinkertainen kaupallinen mittaussovellus toimii varmasti ja WWW-selain on helppo ja tuttu työkalu. Hankalampaa puolestaan olisi mittausraportin koostaminen mittautuloksista ja HTML-lomakkeeseen kirjoitetuista vastauksista. Lomakkeessa voisi olla esimerkiksi upload-toiminto, jolla mittausdata siirrettäisiin arkistoon vastauslomakkeen kanssa. Pahimmassa tapauksessa raportti jouduttaisiin koostamaan paperilla

kahden eri ohjelman tulosteista nitojaa käyttäen.

Toista ratkaisumallia edustaa alusta asti ohjelmoitu sovellus, joka hoitaa kaikki harjoitustyössä vaadittavat tehtävät alusta loppuun. Ohjeet ja mittaukset voisivat olla näkyvillä samanaikaisesti, kuten myös kysymykset. Tulokset, vastaukset ja raportti saataisiin nivottua saumattomasti yhteen. Erityistä huolta vaaditaan itse mittaustoimintojen ohjelmoinnille, jotta mittauksista saadaan luotettavat tulokset. Toteutuksen varjopuolia on työn suuruus ja laadun takaamisen vaikeus.

Ongelma voidaan siis karkeasti ilmaista lähtöä ratkaisemaan joko yhdellä ohjelmalla tai useammasta ohjelmasta koostuvalla ohjelmistolla. Aloitetaan käymällä läpi kaiutinmittaukseen soveltuvia ohjelmia.

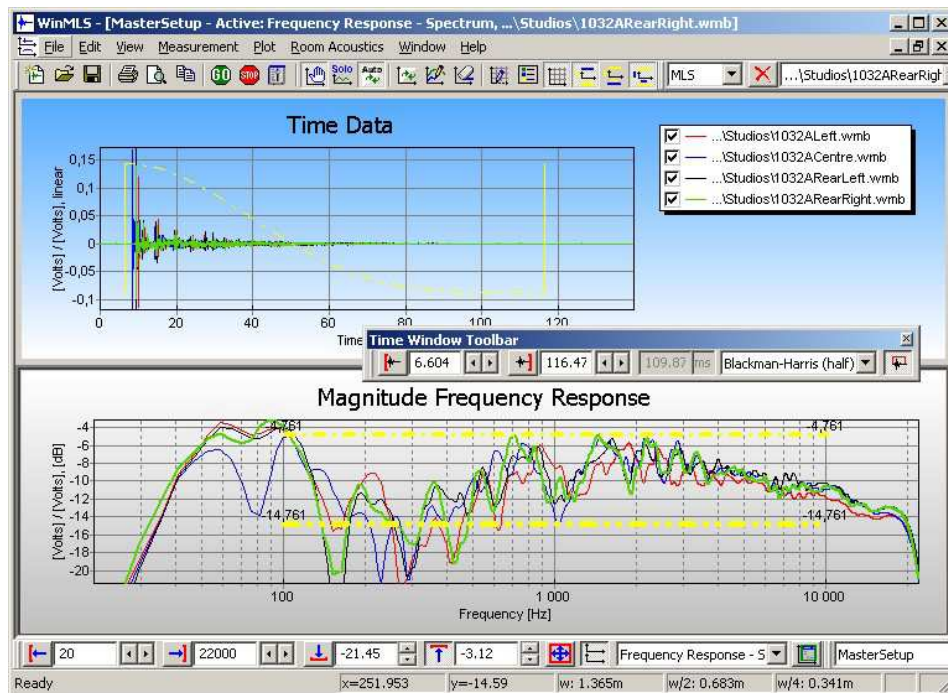
3.5 Mittausohjelmia

Markkinoilla on useita akustisten mittausten tekemiseen soveltuvia ohjelmia. Vaihtoehtoja on itse ohjelmoitavista kehitysympäristöistä valmiisiin laitteistopohjaisiin ratkaisuihin. Tyypillisimpiä ovat PC-laitteistoa ja perusäänikorttia käyttävät, harrastelija-akustiikoille suunnatut ilmaiset tai alemman hintaluokan ohjelmat. Valmiilla ratkaisuilla päästään nopeasti kiinni mittauksiin ja saadaan selvitettyä kaiuttimen magnitudivaste tai huoneen akustiset ominaisuudet vaivattomasti. Ammattilaiset käyttävät luotettavia, pitkälle fyysiseen laitteistoon perustuvia järjestelmiä. Mukautettavampia vaihtoehtoja, kuten MATLAB ja LabVIEW, voidaan alusta asti ohjelmoida toteuttamaan halutut mittaukset ja datan keruut. Sanomatakin on selvää, etteivät kyseiset ohjelmat sovellu kotihifiharrastajan olohuoneen moodien mittaukseen kalliin hintansa ja suuren työmääränsä vuoksi, mutta satoja opiskelijoita varten tehtävään mittausjärjestelmään kaikki vaiva on hyvinkin näkemisen arvoista.

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselta löytyy omasta takaa joukko mittauksiin soveltuvia ohjelmia. Seuraavaksi esittelemme muutamia erilaisia työn aikana läpikäytyjä vaihtoehtoja.

WinMLS 2004

WinMLS (kuva 3.2) edustaa ammatimaista akustisten mittausten ohjelmaa [12]. Ohjelmasta löytyy erilaisia versioita sekä ammattilaisille että yksityishenkilöille. Toiminnallisuus on hinnoiteltu seitsemälle tasolle. Ensimmäisen tason ohjelma soveltuu pienten järjestelmien kalibrointiin. Tasolta kolme alkaa löytyä kaiutinmittaukseen tarvittavia toimintoja, kuten särömittaus yhden taajuden siniaaltoja käyttäen, sinipyyhkäisy taajuusvasteen mittaamiseksi ja mittaustulosten vienti tiedostoon. Tasolta neljä alkaen ohjelmasta löytyy myös MLS-heräte. Tasot 4-7 soveltuvat huoneakustiikan tutkimiseen. Nimensä mukaisesti WinMLS tukee Windows-käyttöjärjestelmää.



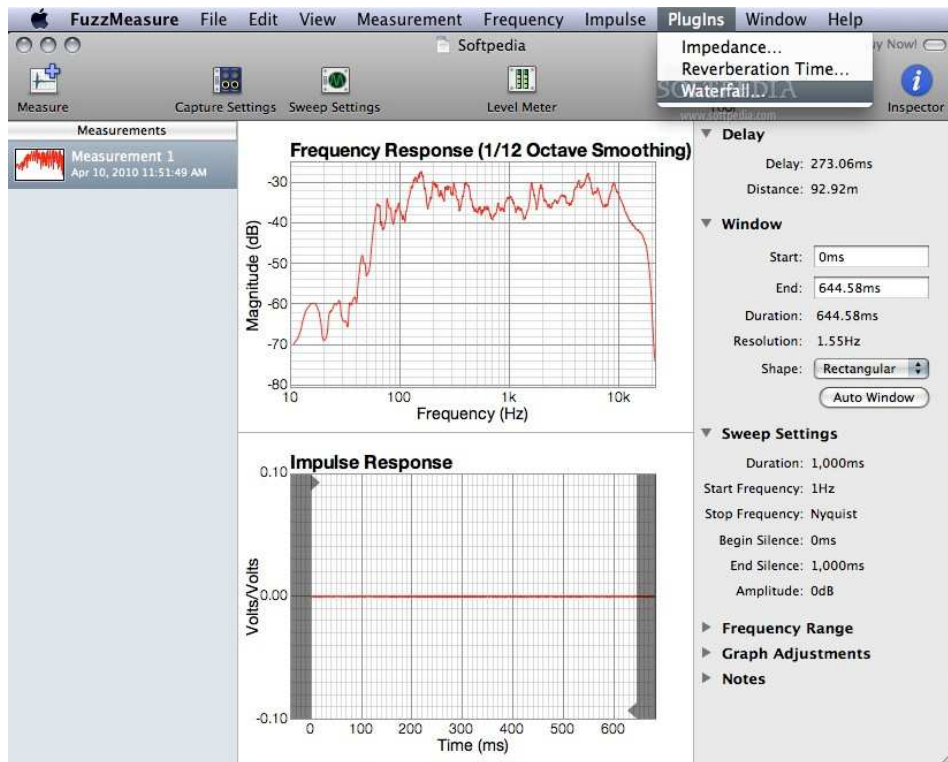
Kuva 3.2: WinMLS 2004

Ohjelmaa voisi suositella esimerkiksi sekä akustisista mittauksista kiinnostuneille harrastelijoille että insinööritoimistoille. Ohjelman hinnat vaihtelevat tasosta riippuen 99\$ - 999\$ tai enemmän.

FuzzMeasure

SuperMegaUltraGroovy:n FuzzMeasure:lla (kuva 3.3) pääsee nopeasti kiinni akustisiin mittauksiin [13]. Ohjelma löytyy ainoastaan MacOS-käyttöjärjestelmälle ja on selvästi suunnattu audioharrastajille. Mittaussignaalina FuzzMeasure käyttää WinMLS:n tavoin logaritmistä sinipyyhkäisyä, jonka pituutta voidaan säätää. Särömittauksissa tarvittavaa yhden taajuuden siniaaltoja ei ohjelmasta saa kätevästi. Tulokset saa hienona grafiikkana vaikkapa PDF-tiedostoon.

Helppokäyttöisyytensä ansiosta FuzzMeasure soveltuisi myös oppilastyöhön. Harjoitustyössä tarvittavaa ohjausta ja kysymysten keräystä ei ohjelma kuitenkaan pysty hoitamaan. Rinnalla olisi käytettävä esimerkiksi HTML-pohjaista opetusohjelmaa, joka johdattelisi mittauksesta toiseen ja kysyisi opiskelijoilta kysymykset. Hintaa tuotteella on 150\$ ja opetuskäyttöön tarkoitettu lisenssi maksaa 90\$.



Kuva 3.3: FuzzMeasure

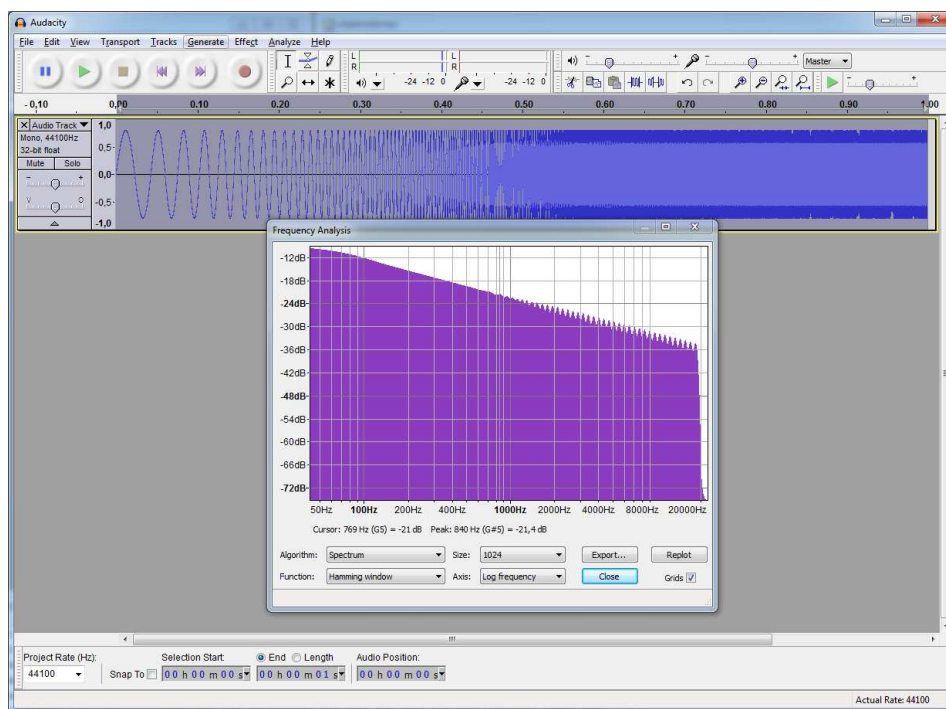
Audacity

Valikoiman OpenSource -vaihtoehto Audacity on monipuolinen äänenkäsittelyohjelma, joka löytyy MacOS-, Linux- ja Windows-käyttöjärjestelmille [14] [15]. Ohjelmalla käyttäjä itse voi generoida erilaisia herätesignaaleita, kuten siniaaltoja ja logaritmisia sinipyyhkäisyjä, toistaa niitä tietokoneen audioulostuloon ja äänittää järjestelmän ulostulosignaalia. Ulostulosignaalin analysointiin löytyy spektrinpiirtotoiminto (kuva 3.4), jolla saadaan piirrettyä taajuusspektrit äänitetyistä signaaleista. Säröanalyysin tekeminenkin onnistuu, lähinnä silmäämääräisesti, mutta kunnollista magnitudivastetta mitattavasta järjestelmästä ei saa. Ohjelma ei myöskään osaa viedä grafiikkaa tiedostoon. Spektrit voi tallentaa tekstitiedostoiksi.

Pääasiassa Audacity on tarkoitettu äänen nauhoittamiseen ja käsittelyyn, ja soveltuu huonosti mittauksiin ja tulosten analysointiin. OpenSource -ohjelmia saa käyttää ilmaiseksi.

Audio Precision

Audio Precision kuuluu akustiikan ammattilaisten työvälineiden joukkoon [16]. Laadukkaat, mutta kalliit laitteistopohjaiset järjestelmät takaavat äärimmäisen luotettavia mittaustuloksia. Laitteet voidaan kytkeä tietokoneeseen AP:n omilla ohjelmilla tai vaikka käyttäen Na-



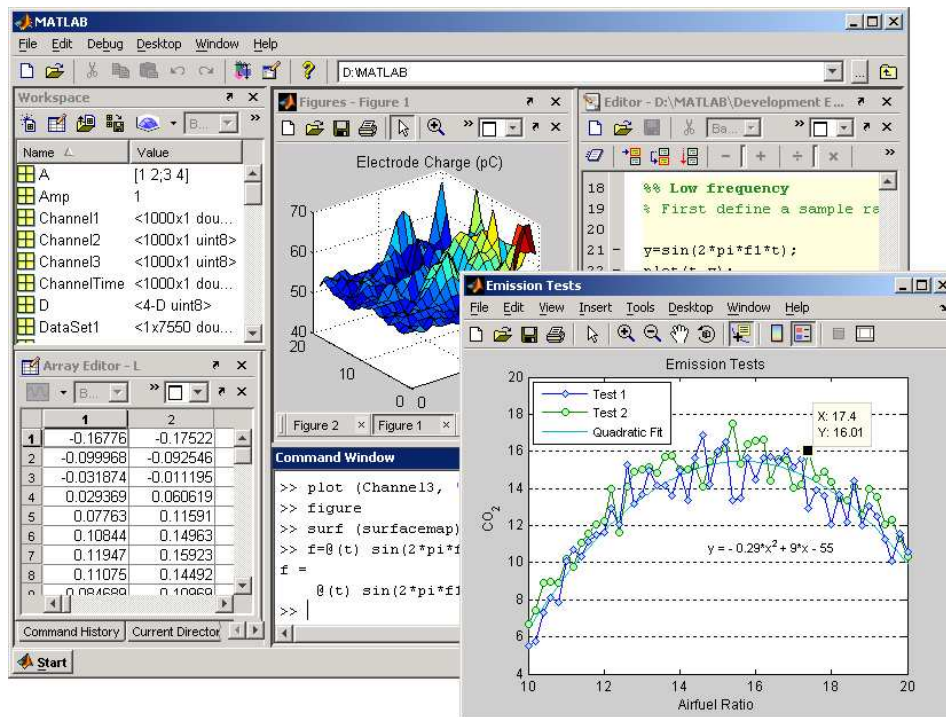
Kuva 3.4: Audacity

tional Instrumentsin LabView:tä. Opetuskäytössä tärkeintä ei ole kuitenkaan pienet virhemarginaalit ja luotettavuus, vaan periaatteen opettaminen opiskelijoille. Näin ollen rajaamme tämän järjestelmän kustannussyistä enemmän tarkastelun ulkopuolelle.

MATLAB

Ylemmän tason ohjelmointikieli, MathWorks:n MATLAB (kuva 3.5), tarjoaa tehokasta laskentaa ja signaalinkäsittelyä [17]. Teknillisen korkeakoulun opiskelijoille monessa yhteydessä tutuksi tullut ohjelma mahdollistaa sopivia lisäpalikoita käyttämällä myös syötteiden toiston ja vasteiden tallennuksen. Herätesignaalit ohjelmoidaan itse, kuten myös vasteiden laskennat. Tulokset saadaan vietyä suoraan esimerkiksi EPS-tiedostomuotoon, jonka voi helposti liittää raporttiin. Vaikka MATLAB:lla on mahdollista toteuttaa tarvittavat mittaukset, käyttöliittymän rakentaminen opiskelijoita varten on työläs toteuttaa. Myös kysymysten ja vastausten käsittelyyn tarvitaan joku toinen ohjelma.

Matlab on tarjolla useille käyttöjärjestelmille, kuten Windows, Linux/Unix ja MacOS. Teknillisessä korkeakoulussa on käytössä MATLAB-kampuslisenssi, jolloin erillistä hankintaa ei tarvittaisi.



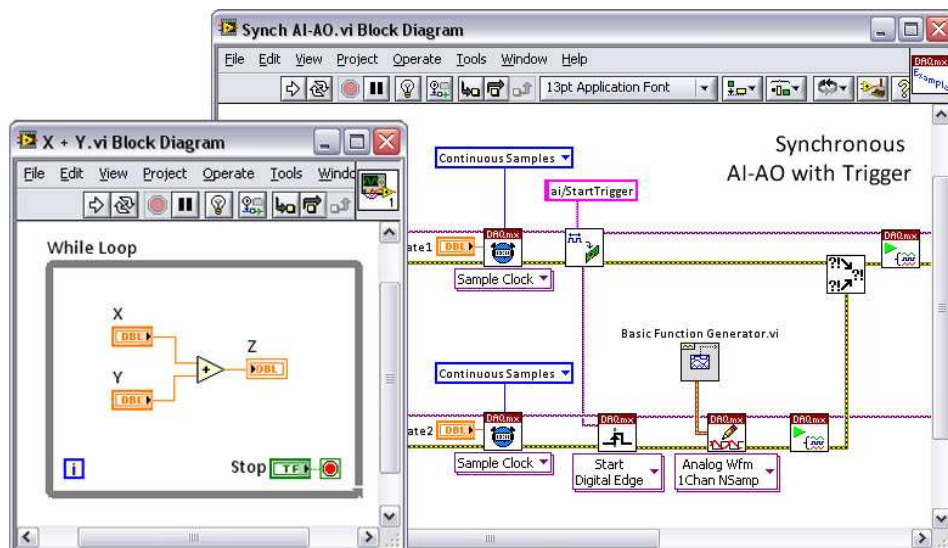
Kuva 3.5: MATLAB

LabVIEW

Mittaus- ja automaatio-sovellusten kehitysympäristö, National Instruments:n LabVIEW (kuva 3.6), tarjoaa erilaisen lähestymistavan kaiutinmittaukseen [3]. LabVIEW soveltuu erityisesti suurten järjestelmien ammattimaiseen hallintaan. Ohjelmointi tapahtuu graafisesti erilaisia komponentteja, funktioita ja ohjaimia yhdistelemällä lohkokaaviomaiseksi kokonaisuudeksi. Käyttäjä rakentaa kuvaruudulla reaaliaikaisen virtuaalisen „laitteen”, eli virtuaalistrumentin (VI) käyttöliittymineen. VI voi pitää sisällään paitsi LabVIEW:n omia funktioita, myös muiden ohjelmointikielten ja shell scriptien yhdistelmiä. Erityisen kätevä opetuskäyttöä ajatellen on mahdollisuus mittausraportin generointiin automaattisesti. Raporttiin voidaan liittää mitä vain, muunmuassa tekstikenttiä (teoriakysymykset) ja mittareiden näkymiä käyttöliittymän etupanelista (mittaustulokset).

Itse mittauksiin käsiksi pääseminen on kohtalaisen työn takana, koska mittausjärjestelmä on rakennettava (ohjelmoitava) itse. Opetuskäyttöä ajatellen vaiva on kuitenkin näkemisen arvoista.

LabVIEW on saatavilla Windows, MacOS ja Linux -käyttöjärjestelmille. Käytännössä Windows -versio on parhaiten tuettu, etenkin laiteajureiden osalta. Myös LabVIEW on TKK:ssa kampuslisenssinä.



Kuva 3.6: LabVIEW

Luku 4

Toteutus

Ohjelmiston suunnittelu opetuskäyttöön on yleinen ongelma. Monilla kursseilla suoritetaan nykyään tietokoneavusteisia mittauksia tai muita automatisoituja tehtäviä opiskeltavan aihealueen piiristä. Yhteistä näille töille on se, että tietokoneella pyritään luomaan kaikkien osapuolten työtä helpottavia toimintoja. Tietokoneita löytyy nykyään lähes jokaiselta pöydän kulmalta, joten resurssin käyttöönvaljastus on paikallaan. Akustisen mittauksen opetusta, jota tässä työssä lähemmin tarkastellaan, voidaan ajatella erikoistapauksena. Tarkoituksena on löytää yleispätevä ratkaisumalli, jonka mukaan voidaan toteuttaa opetus- ja mitausohjelmia muillekin kursseille.

Ratkaisua etsiessä ongelmaa tarkasteltiin seuraavanlaisista näkökulmista.

Opiskelija

Opiskelijan näkökulmasta katsottuna ensisijaista on opetettavan asian omaksuminen ja sen eteen tehdystä työstä opintosuoritusmerkinnän ja arvosanan saaminen. Asian omaksumista auttaa, mikäli aihepiiriin saa kosketuspintaa oman harrastuneisuuden ja käytännön kautta. Akustisen mittauksen harjoitustyössä on itsessään sisäänrakennettuna motivoiva koukku. Monelle harrastelijahifistille on varmasti mahtava tilaisuus päästä mittaamaan esimerkiksi omaa projektikaiutinta oikeassa mittausympäristössä. Tästäkin huolimatta harjoitustyön tekeminen on opiskelijalle aina uusi ja jännä tilanne.

Järkevä ajankäyttö harjoituksessa helpottaa asian oppimista, kun energiaa ei tuhlaannu puutteellisen ohjeistuksen tai huonosti laaditun mittausjärjestelmän takia. Työtä tehdessä opiskelijan tulee olla ajan tasalla siitä, mitä milloinkin mitataan ja mitä häneltä vaaditaan. Turhautumista varmasti ilmenee, mikäli käytettävä ohjelma ei toimi kunnolla, on hidas tai kaatuu kesken harjoituksen. Opiskelijan kannalta tärkeimmiksi kriteereiksi nousevat ohjelman käytettävyys ja työohjeiden selkeys.

Opettaja

Ihannetapaus itseohjaavalla kurssilla olisi, ettei opettajaa tarvittaisi muulloin kuin pitämään aloitusluento ja arvostelemaan loppuraportit. Tämä utopia harvoin toteutuu, mutta tietokoneavusteisessa opetuksessa oleellinen tavoite on, että opettajan työmäärä vähenee tietokoneen ansiosta ja opiskelija pääsee oppimaan omatoimisen työskentelyn kautta. Mitä paremmin opettaja pääsee laatimaan ohjeita ja harjoituksen läpivientiä, sitä vähemmän hänen tarvitsee ohjeistaa opiskelijoita jokaisen harjoitustyövuoron aikana.

Harjoitustyön päätyttyä opiskelijat poistuvat paikalta, jättäen jälkeensä mittausdataa ja vastauksia. Näiden koostaminen on yleensä aikaa vievää puuhaa, varsinkin jos opiskelijoita kurssilla on paljon. Mikäli opiskelijat pääsevät tallentamaan tuloksiaan itse miten haluavat, voi tulosten jäljittäminen arvostelua varten oikeaan opiskelijaan olla miltei mahdotonta. Tällaista tilannetta tulee välttää kaikin keinoin. Myös opettajan kannalta on turhauttavaa jos tietokoneohjelma aiheuttaa käytettävyydellään opiskelijoille harmia. Harjoitukset venyvät syyttä, eivätkä opiskelijat ole tyytyväisiä. On suorastaan kiusallista, mikäli ohjelma kaatuu tuon tuostakin. Voidaankin todeta, että opettajalla on pitkälti samat kriteerit ohjelmalle kuin opiskelijoillakin, lisäksi loppuraportin koostamisen helppous ja selkeys.

Ylläpito

Kolmas ryhmä, jota tietokoneiden valjastaminen opetuskäyttöön koskettaa, on organisaation ylläpito. Kun tietokone kytketään osaksi harjoitustyötä, se tietenkin työllistää yksikön ylläpitoa. Ylläpidon ensisijaiset tehtävät ovat vastata yksikön tietoturvasta ja ATK-laitteistosta. Harjoitustyössä käytettävät ratkaisut eivät saa kohtuuttomasti työllistää ylläpitoa eksootisuudellaan. Yllättävien laitevikojen sattuessa on kätevää, mikäli varastosta löytyvillä varaosilla saadaan tilanne pelastettua nopeasti. Paitsi että mittausohjelman itsessään on oltava turvallinen, se ei saa käyttää alustaa ja käyttöjärjestelmää, jotka eivät täytä tietoturva vaatimuksia. Yksinkertaisinta ylläpidon kannalta olisi käyttää yksikössä jo olemassa olevia ratkaisuja.

Toteutus ja kustannukset

Toisessa vaakakupissa yllä mainittujen kriteereiden kanssa ovat toteutuksen vaatimat resurssit. Ilmiselvää on, että toimivasta ratkaisusta kannattaa maksaa ja hyvän kokonaisuuden eteen joutuu näkemään vaivaa. Onnistuneilla valinnoilla voidaan saavuttaa synergiaetua myös yksikön muiden tehtävien kanssa. Hyvää mittausjärjestelmää voidaan käyttää tutkimuksessa tarvittaviin mittauksiin ja onnistunutta harjoitustyökonseptia voidaan hyödyntää muillakin kursseilla. Harkinnan alla olleista vaihtoehdoista mikään ei vaikuta liian hintavalta, kun suljetaan pois Audio Precisionin kaltaiset tähän tarkoituksen liian raskaat ratkaisut. Toteu-

tuksen työmäärä eroaa vaihtoehtojen välillä. Olisi huomattavasti vähemmän työlästä valita FuzzMeasuren kaltainen valmis, helppokäyttöinen ohjelma, ja antaa opiskelijoille ohjeet ja kysymykset paperilla eteen, kuin ryhtyä kasaamaan koko pakettia LabVIEW:n sisään, saati lähteä itse ohjelmoimaan sovellusta alemman tason ohjelmointikielellä alusta loppuun saakka.

4.1 Alustan valinta

Opetusohjelmaa lähdettiin toteuttamaan LabVIEW -kehitysympäristöllä. LabVIEW:stä otettiin käyttöön versio 8.6.1, joka oli työn aloitushetkellä laitoksella uusin saatavilla oleva versio. Melkein kaikki vertailussa olleet ohjelmat suoriutuivat itse kaiutinmittauksista. Päätökseen vaikuttivat ensisijaisesti opiskelijoita helpottavan käyttöliittymän luomisen mahdollisuus, sekä etenkin kurssin opettajaa auttavan mittausraportin luomisen kätevyys. Mittaustekniikan ryhmän käytössä jo vuosia ollut ohjelma on tullut tutuksi laitoksen ylläpidolle, johon itsekin kuulun. LabVIEW:n alustaksi sopii melkein mikä tahansa laitoksen tietokone, eikä erillisiä laitehankintoja näin ollen tarvita. Lisäksi LabVIEW on hyvin tuettu National Instruments:n toimesta päivitysten ja erilaisten seminaarien muodossa. LabVIEW-kehitysympäristö löytyy Windows-, Linux- sekä MacOS-käyttöjärjestelmille. Parhaiten tuetuna on Windows-käyttöjärjestelmä.

Mac-tietokoneiden äänikortteja pidetään edelleenkin yleisesti laadukkaina ja Mac-tuotteita muutenkin audio-sovelluksiin ylivertaisina vaihtoehtoina Windows-pohjaisiin PC-laitteisiin nähden. Luotettaviin mittauksiin ja ammattimaiseen äänenkäsittelyyn tarvitaan kuitenkin erillinen audio-interface. Muunmuassa RME [18] valmistaa laadukkaita audio-interfaceja, jotka tukevat sekä MacOS- että Windows-käyttöjärjestelmiä. Oma kokemukseni ammattimaisen audiotuotannon parissa on osoittanut, että alustalla ei ole mitään merkitystä lopputulokseen, erot ovat pitkälti perinteissä ja tottumuksissa.

Alustavaihtoehtoja tutkittiin seuraavasti. Käytössä oli *MacBook*, jossa *MacOS 10.5* käyttöjärjestelmä [19], sekä „klooni-PC” (Intel Celeron 3 GHz, 2GB RAM), johon asennettiin Windows *Vista* ja Linux *CentOS 5.2* käyttöjärjestelmät [20], [21]. CentOS oli luonnollinen valinta useista Linux-distributioista, koska se käyttää ohjelmien asennukseen Red-Hatista tuttua RPM-paketinhallintajärjestelmää ja NI toimittaa LabVIEW:n Linux-version RPM-paketteina [22]. LabVIEW asennettiin kaikille alustoille. Peruspaketti asentui kiltisti kaikkiin käyttöjärjestelmiin ja kehitysympäristö käynnistyi ilman ongelmia. Ensimmäiseksi testattiin mahdollisimman yksinkertaisella ohjelmalla miten koneen omalla äänikortilla saadaan tuotettua ja tallennettua ääntä LabVIEW:stä käsin. LabVIEW:n ääni I/O funktiot tuntuivat toimivan parhaiten Windows-installaatiossa. Varsinkin reaaliaikainen äänipuskuriin kirjoittaminen toimi testatuista järjestelmistä sulavasti ainoastaan Windowsilla.

Myöskään kaikki LabVIEW:n lisäosat eivät ole saatavilla kuin Windows-versiolle. Mittauskäyttöön soveltuvia Windows-koneita löytyy laitokselta runsaasti, eikä uutta tietokonetta tarvitse hankkia kurssia varten. Laitevian sattuessaa kloonin-PC on helppo korvata toisella vastaavanlaisella koneella.

Käyttöjärjestelmäksi valittiin 64-bittinen Windows Vista Enterprise, jolle Microsoft on ilmoittanut tuen jatkuvan vuoteen 2017 asti. Vista oli työn aloitushetkellä olemassa olleista Windows-käyttöjärjestelmistä uusin, jota National Instruments oli ilmoittanut tukevuksa LabVIEW 8.6.1 versiollaan. Vaikkakin Windows on tunnettu lukuisista turvarei'istään, on järjestelmä oikein ylläpidettynä ja käytettynä turvallinen. Microsoft julkaisee säännöllisesti päivityksiä, jotka voidaan käyttöjärjestelmässä määrittää asentumaan automaattisesti. Myöskään mittauskoneeseen ei ole tarpeellista asentaa Flash-playeria, tai muitakaan uusia, mahdollisesti tietoturvaluusuuuua vaarantavia viihdesovelluksia.

Sovellusta lähdettiin rakentamaan aluksi tällä konfiguraatiolla, käyttäen tietokoneen sisäistä äänikorttia. Äänikortin laatua testattiin tekemällä taajuusvastemittauksia siten, että äänikortin ulostulo kytkettiin suoraan sisäänmenoon (*loop back*). Testeissä huomattiin, että äänikortin ajuri halusi muokata ääntä lennossa, eivätkä taajuusvaste ja säröarvot vaikuttaneet muutenkaan kovin lupaavilta. Myöhemmin käyttöön otettiin Roland:n valmistama ulkoinen USB audio-interface *Edirol UA-101* [23]. Edirolilla tehtyjen loop back -testien tulokset olivat huomattavasti parempia. Taajuusvaste mitattavalla alueella oli käytännössä täysin suora ja säröarvot reilusti alle prosentin.

4.2 LabVIEW

LabVIEW kehitysympäristö on palvellut insinöörejä ja tutkijoita yli 20 vuoden ajan toteuttamaan vaativia mittaus-, testaus- ja ohjausjärjestelmiä graafista ohjelmointia ja vuokaavioajattelutapaa hyväksikäyttäen. LabVIEW tarjoaa integrointimahdullisuuden tuhansiin laitteisiin ja sisältää satoja sisäänrakennettuja kirjastoja haastavaan data-analyysiin ja tulosten esittämiseen. Näitä kaikkia ominaisuuksia voidaan käyttää hyväksi virtuaali-instrumenttien luomisessa.

LabVIEW skaalautuu tarpeiden mukaan. Pohjana toimii LabVIEW Development system, eli kehitysympäristö. Kehitysympäristöjä on eri laajuisia (Base, Full ja Professional) erilaisiin tarpeisiin. Perusversio sisältää oleelliset toiminnot graafisen käyttöliittymän luontiin, datan keruuseen, instrumenttien ohjaukseen ja raportointiin. Full-versiossa käyttöliittymän laatiminen on viety pidemmälle; koodin integrointia, matemaattisia funktioita ja analyysimenetelmiä on rutkasti lisää. Professional-versiolla voidaan luoda mm. asiakassovelluksia, .exe muotoisia ajettavia ohjelmia. [3]

4.2.1 LabVIEW:n lisäosat

LabVIEW:hin on saatavilla runsaasti erilaisia lisäosia, moduleita. Moduleilla voidaan lisätä yhteensopivuutta kolmannen osapuolen laitteisiin ja sovelluksiin, lisätä data-analyysin menetelmiä, tietokantoja, erilaisia simulaatioita, raportointia tai vaikkapa web-integrointia. Seuraavaksi esitellään muutamia tämän työn kannalta merkittävimpiä moduleita.

NI LabVIEW MathScript RT Module MathScript on LabVIEW:n moduli, joka mahdollistaa MATLAB-tyylisen tekstipohjaisen koodin tai itsetehtyjen .m tiedostojen ajon virtuaali-instrumentin sisällä reaaliajassa. MathScript ikkunassa voi laatia, ladata, tallentaa ja suorittaa .m skriptejä sekä yhdistellä tekstipohjaisia muuttujia LabVIEW:n graafisiin sisääntuloihin ja lähtöihin. Näin saadaan kätevästi yhdistettyä tehokas tekstipohjainen ohjelmointi, graafinen ohjelmointi, käyttöliittymät ja lähes rajattomasti laiterajapintaa.

NI Sound and Vibration Toolkit Akustisten mittausten kannalta mielenkiintoisin lisäosa on Sound and Vibration Toolkit. Paketti sisältää suuren joukon stand-alone sovelluksia akustisten mittausten suorittamiseen. Mukana on myös paljon hyödyllisiä virtuaali-instrumentteja ja funktioita LabVIEW-kehitysympäristölle. Toolkitistä löytyy muun muassa MLS-signaaleita, sinipyyhkäisyjä, painotussuotimia ja oktaavianalyysiaattoreita.

NI LabVIEW SignalExpress SignalExpress -paketti tarjoaa nopeita ratkaisuja signaalin käsittelyyn ja analysointiin. Taajuusvasteet ja suodattimet hoituvat lohkokaaviossa yhdellä komponentilla, eikä signaalinkäsittelyn teorian tuntemusta tai ohjelmointitaitoja välttämättä tarvita.

4.2.2 Virtuaali-instrumentti

LabVIEW:llä luotuja sovelluksia kutsutaan virtuaali-instrumenteiksi (VI), koska ne pyrkivät näyttämään ulkoasultaan fyysisiltä laitteilta, kuten oskilloskoopilta tai yleismittarilta. Instrumentti koostuu käyttöliittymästä (etupaneeli) ja lohkokaaviosta. Ensin laitteelle laaditaan käyttöliittymä, joka muodostuu ohjaimista ja indikaattoreista. Ohjaimia ovat mm. painikkeet, kiertokytkimet ja valitsimet. Indikaattoreita ovat graafiset näytöt, LEDit ja mittarit. Lohkokaavio pitää sisällään sovelluksen toiminnallisuuden, algoritmit ja kytkennät käyttäjärajapintaan sekä laitteistorajapintaan. Itse ohjelmointi tapahtuu lohkokaaviossa yhdistelemällä tuloja, lähtöjä, silmukoita, etupaneelin indikaattoreita ja ohjaimia, funktioita ja toisia virtuaali-instrumentteja.

4.3 Sovelluksen toteutus virtuaali-instrumenttina

Tässä osiossa käymme läpi opetuskäyttöön laaditun virtuaali-instrumentin rakennetta. Tarkastelemme ohjelman käyttöliittymää ja toiminnallisuutta harjoitustyön kulun mukaan jäsennehtynä. Tämän työn on muun muassa tarkoitus toimia esimerkkinä, kuinka opetusohjelma voidaan toteuttaa LabVIEW:n avustuksella. Käymme läpi vastaan tulleita ongelmia ja niiden ratkaisuja, esimerkkejä vaihtoehtoisista toteutustavoista sekä esittelemme sovelluksen kannalta keskeisimpiä virtuaali-instrumentteja. Työn on tarkoitus antaa käsitys myös siitä, miten LabVIEW:tä voidaan hyödyntää akustiikan alan tutkimuksessa ja mittausjärjestelmissä.

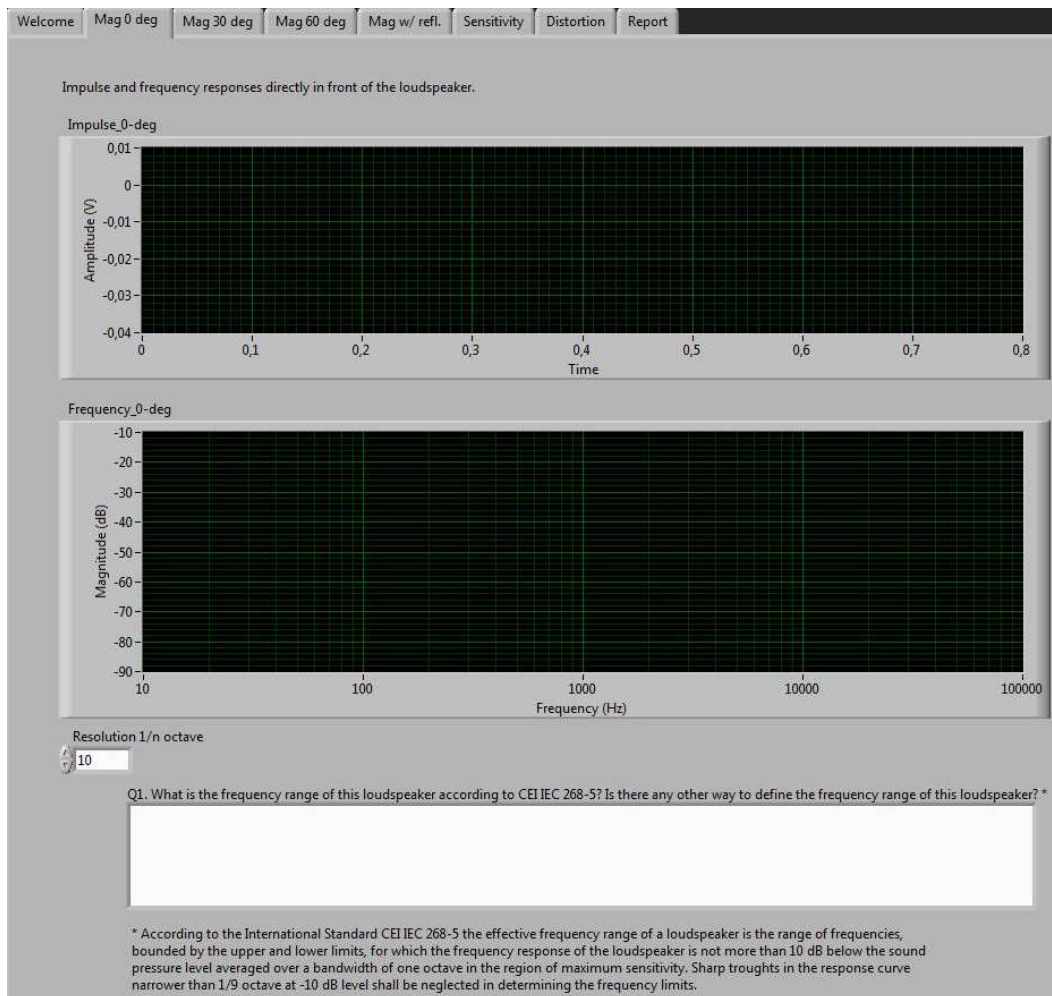
Sovelluksen rakentamisen alkuvaiheessa SignalExpress -funktioista ja Sound and Vibration Toolkitistä oli apua siten, että kokonaisuuteen päästiin nopeammin käsiksi. Syventymisen yksityiskohtiin, kuten tulosten esitykseen ja tallentamiseen, osoitti käytännössä sen, että valtaosa toiminnoista jouduttiin ohjelmoimaan itse erilliskomponenteista.

4.3.1 Käyttöliittymä

Ohjelmistokehityksessä tärkeimpiä osa-alueita edustaa käyttöliittymäsuunnittelu. Tehokaskin ohjelma on käytännössä kömpelö ja hidas, mikäli käyttäjältä kestää kauan aikaa toimintojen löytäminen ja ohjelmaan perehtyminen. Opetuskäytössä tämä vaikutus korostuu entisestään. Opiskelijan on voitava keskittää ajatustyö opittavaan asiaan, joten ohjelman käyttö ei saa tuottaa ylimääräistä päänsärkyä.

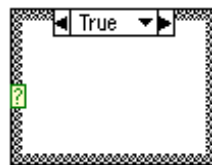
Kurssin opetusohjelmaan laadittiin välilehti-tyyppinen käyttöliittymäratkaisu. Kuvassa 4.1 on kuvaruutukaappaus magnitudivastemittauksen välilehdeltä. Käyttäjä saa kertasilmäyksellä kokonaiskuvan mittauksen kulusta ja suoritettavien tehtävien määrästä. Välilehdeltä toiselle voidaan siirtyä koska vain. Tämä on erityisen näppärää jos opiskelija haluaa tarkistaa edellisen mittauksen tuloksen vertailua vaativien kysymysten kohdalla. Jokainen mittaus ja siihen liittyvä kysymys on omalla välilehdellään. Kun kaikki kytkennät on tehty, opiskelija suorittaa virtuaali-instrumentin klikkaamalla LabVIEW:n ohjelmanajokuvaketta (valkea nuoli vasemmassa yläkulmassa).

Välilehdet sisältävät mittauksen lisäksi myös ohjeita ja muita mittauksessa tarvittavia lisätietoja. Kun mittaus on valmis, opiskelija vastaa lehden alareunassa esitettyyn kysymyseen. Kysymysten tarkoitus on saada opiskelija pohtimaan suorittamaansa mittauksista välittömästi ja korjaamaan mahdolliset virheet. Mittauksen voi suorittaa uudestaan, mikäli kysymystä pohdiskellessaan huomaa tehneensä mittausvirheen. Viimeinen välilehti pitää sisällään lisää teoriakysymyksiä ja raportin generoinnin. Kun kaikkiin kysymyksiin on vastattu, VI suoritetaan viimeisen kerran. Tässä vaiheessa ohjelma kerää kaikkien kysymysten vastaukset yhteen loppuraporttiin, eli aiemmin annettuja vastauksiakin voi käydä viilaamassa vielä loppumetreille saakka.



Kuva 4.1: Kaiutinmittausohjelman käyttöliittymä

Käyttöliittymän kieleksi valittiin englanti. Myös kysymykset ja ohjeet ovat englanniksi.



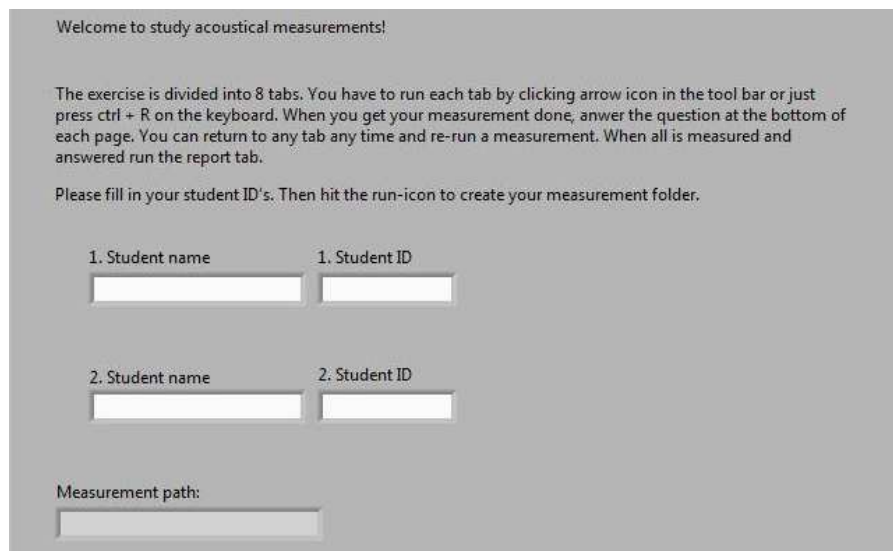
Kuva 4.2: Lohkokaavion Case Structure -komponentti [3]

Välilehtitoteutus on valitsin-tyylinen kontrolleri *selector*. Jokainen käyttöliittymän välilehti edustaa yhtä lohkokaaavion *Case Structure* -komponentin tapausa *case*. Jokaiseen tapaukseen ohjelmoidaan lohkokaaviossa tarvittavat toiminnot. Tapaus voi sisältää kaikkia

LabVIEW:n komponentteja, mukaan lukien uusia case-rakenteita. Yksinkertaisin Case Structure on kaksitapauksinen kuten *true/false*. Case Structure -komponenttiin vaaditaan ohjaussignaali valitsimelta, esimerkiksi käyttöliittymän välilehtivalitsimen ulostulo. Lisäksi komponenttiin voidaan asettaa tuloja ja lähtöjä muille signaaleille. Kuvassa 4.2 on esitetty yksinkertainen lohkokaaavion Case Structure komponentti.

4.3.2 Mittauksen alustus

Käynnistyttyään ohjelma tervehtii käyttäjää kohteliaasti ja toivottaa tämän tervetulleeksi mittausten pariin. Ensimmäiseksi kerätään käyttäjän tiedot (opiskelijoiden nimet ja opintokirjannumerot). Tämän jälkeen ohjelma luo käyttäjälle hakemiston, johon mittausdatat ja mittausraportti tallennetaan. Mikäli vähintään yhtä opiskelijanumeroa ei ole syötetty, ohjelma kieltäytyy tallentamasta dataa ja antaa virheilmoituksen. Näin opettaja voi taata, että opiskelijat saavat tehdystä työstä ansaitsemansa opintosuoritusmerkinnät. Kun ensimmäinen vaihe on suoritettu, ohjelma kehottaa opiskelijoita siirtymään mittauksiin.



Welcome to study acoustical measurements!

The exercise is divided into 8 tabs. You have to run each tab by clicking arrow icon in the tool bar or just press ctrl + R on the keyboard. When you get your measurement done, answer the question at the bottom of each page. You can return to any tab any time and re-run a measurement. When all is measured and answered run the report tab.

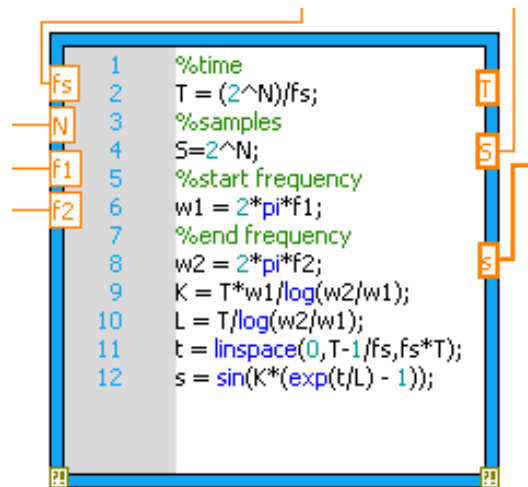
Please fill in your student ID's. Then hit the run-icon to create your measurement folder.

1. Student name	1. Student ID
<input type="text"/>	<input type="text"/>
2. Student name	2. Student ID
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Measurement path:	
<input type="text"/>	

Kuva 4.3: Aloitusivu

4.3.3 Magnitudi- ja impulssivasteet

Kaiuttimen magnitudi- ja impulssivasteet mitataan suoraan kaiuttimen edestä sekä 30 ja 60 asteen kulmista. Lisäksi mitataan vasteet heijastavan levyn tapauksessa, jossa kaiuttimen edessä verkolla on vanerilevy aiheuttamassa heijastuksia mittaukseen. Jokaisen tapauksen vastemittaukset ovat omalla lehdellään mittausohjelmassa ja jokaiseen liittyy omat kysymyksensä.

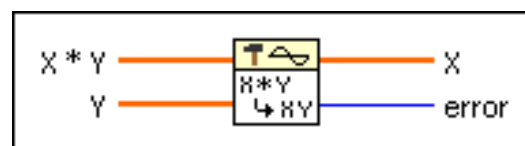


Kuva 4.4: Herätefunktio MathScript -ikkunassa

Impulssivaste

Sopivanlaisen herätteen luomiseksi käytettiin MathScriptiä (kuva 4.4). Herätefunktiona käytetään logaritmistä sinipyyhkäisyä taajuuskaistalla 20-20000 Hz. Luotu heräte ohjataan äänikortin ulostuloon, josta se ajetaan audiovahvistimen kautta kaiuttimelle. Kaiuttimesta mikrofonilla siepattu signaali vahvistetaan mittausvahvistimessa ja luetaan takaisin ohjelmaan äänikortin sisääntulosta. Ohjelma laskee lennossa herätteen ja vasteen välisen dekonvoluution, eli impulssivasteen. Impulssivaste tallennetaan opiskelijan työhakemistoon jatkokäsittelyä varten näytteenottotaajuudella 44.1 kHz, 16 bittiä. Tiedostomuoto on pakkaamaton .WAV.

LabVIEW käyttää dekonvoluutioon Fourier-muunnosta. Kuten teoriaosiossa todettiin, työläs konvoluutiointegraali muuttuu Fourier-tasossa kertolaskuksi. Numeerinen Fourier-muunnos on nopea ratkaista tietokoneella. LabVIEW:n valmiin dekonvoluutio VI:n toiminta on seuraavanlainen [3] (kuva 4.5):



Kuva 4.5: Dekonvoluutio VI [3]

1. Lasketaan Fourier-muunnos sekvenssille $X * Y$.
2. Lasketaan Fourier-muunnos sekvenssille Y .

3. Jaetaan $X * Y$:n Fourier-muunnos Y :n Fourier-muunnoksella.
4. Jakolaskun tulokselle suoritetaan käänteinen Fourier-muunnos, jolloin saadaan X .

Magnitudispektri

Seuraavaksi lähdetään ratkaisemaan magnitudispektriä, eli mitattavan järjestelmän magnitudivastetta. Ohjelma laskee impulssivasteen Fourier-muunnoksen, eli taajuusvasteen. Mikäli koodia haluttaisiin optimoida, voitaisiin aiemmin mainittu dekonvoluutio VI korvata erilliskomponenteilla edellä kuvatun mallin mukaisesti. Näin laskenta-aikaa säästettäisiin yhden Fourier-muunnoksen verran, koska Fourier-muunnosten $X * Y$ ja Y jakolasku (vaihe 3.) on itsessään impulssivasteen Fourier-muunnos (taajuusvaste). Koska operaatioiden ajoon ei kulunut huomattavasti aikaa, päätettiin selkeyden vuoksi kuitenkin käyttää valmista dekonvoluutio VI:a (kuva 4.5) ja laskea impulssivasteen Fourier-muunnos uudestaan.

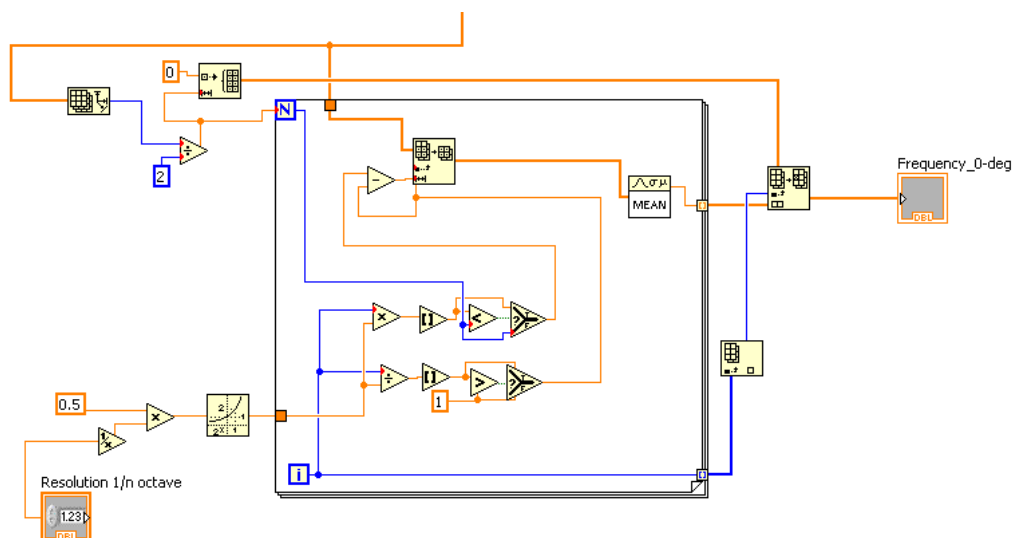
Magnitudivastetta varten lasketaan taajuusvastefunktiosta itseisarvo, sekä muunnetaan arvot dB-asteikolle. Magnitudispektrille suoritetaan lopuksi taajuuskeskiarvoistus luotettavamman mittaustuloksen saavuttamiseksi. Valmiin *Frequency Response Express* -funktion sijaan päädyttiin magnitudispektri ratkaisemaan käyttäen erilliskomponentteja edellä kuvatulla tavalla. Tämä mahdollistaa esityksen jokaisen parametrin säätöä käyttöliittymästä käsin, mikä antaa ohjelmalle enemmän opetuksellista lisäarvoa. Tästä hyvänä esimerkkinä käy taajuuskeskiarvoistuksen eli pehmennyksen laskenta, johon LabVIEW:n omat VI:t eivät ottaneet kantaa.

Magnitudispektrin taajuuskeskiarvoistus

Kansainvälisen standardin CEI IEC 268-5 mukaan kaiuttimen taajuusalue on se ylä- ja alarajataajuuksien väliin jäävä alue, jolla taajuusvaste on korkeintaan 10 dB alle kaiuttimen herkimmällä alueella yhden oktaavin kaistalla keskiarvoistetun äänenpainetason. Terävät kuopat -10 dB tasolla, jotka ovat kapeampia kuin 1/9 oktaavia, jätetään huomioimatta taajuusaluetta määritettäessä.

1/n oktaavin pehmenys toteutetaan laskemalla kunkin pistetaajuuden arvoksi tätä ympäröivän kaistan keskiarvo. Käytettävän pehmennyksen arvo n valitaan käyttöliittymästä ennen mittausta. Pehmennyksen laskuun kokeiltiin aluksi MathScriptiä syystä, että olisi ollut selkeämpää toteuttaa keskiarvoistus tekstipohjaisena skriptinä. For-silmukan toteutus reaaliajassa otti kuitenkin liikaa aikaa ja tuloksen esittämiseen tuli useamman sekunnin viive. LabVIEW:n graafisia komponentteja käyttäen täysin sama laskutoimitus otti huomattavasti vähemmän aikaa, vaikkakin toteutus näyttää lievästi sanottuna sekavalta (kuva 4.6). Vertailun vuoksi on myös esitetty miltä keskiarvoistus .m skriptillä toteutettuna näyttäisi:

```
K = 2^(0.5*c);
N = length(X)/2;
X2 = zeros(N,1);
for n = 1:N,
    imin = max(1,round(n/K));
    imax = min(N,round(n*K));
    X2(n) = mean(X(imin:imax));
end;
```



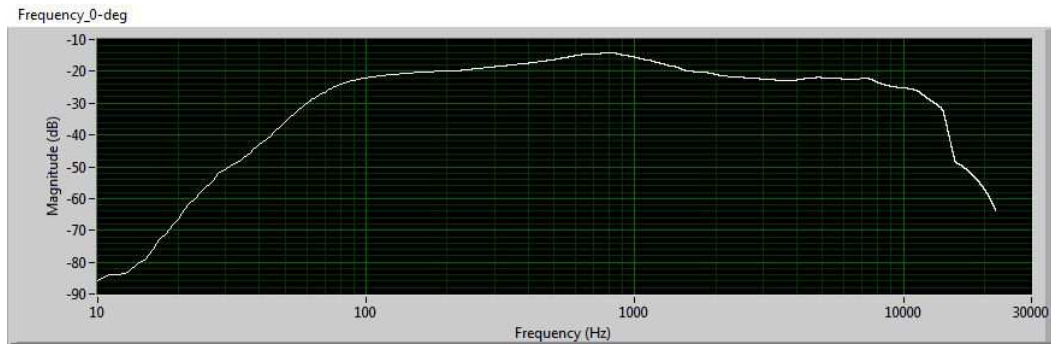
Kuva 4.6: Taajuuskeskiarvoistuksen toteutus lohkokaaavion komponenteilla

Lopuksi näytölle tulostetaan impulssivaste, sekä 1/n oktaavikaistalla pehmennetty magnitudivaste (kuva 4.7). Magnitudivaste esitetään logaritmisella taajuusasteikolla.

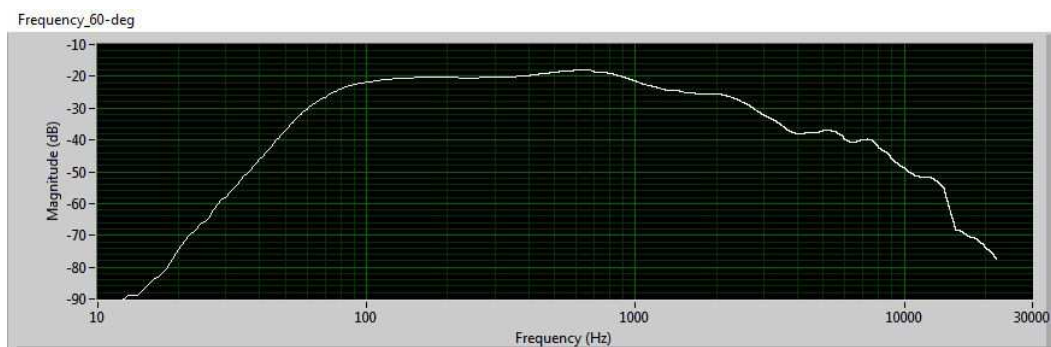
4.3.4 Vasteiden analysointi

Ensimmäinen kysymys liittyy kaiuttimen taajuusvasteeseen. Opiskelijaa pyydetään määrittämään kaiuttimen CEI IEC 268-5 -standardin mukainen taajuusvaste.

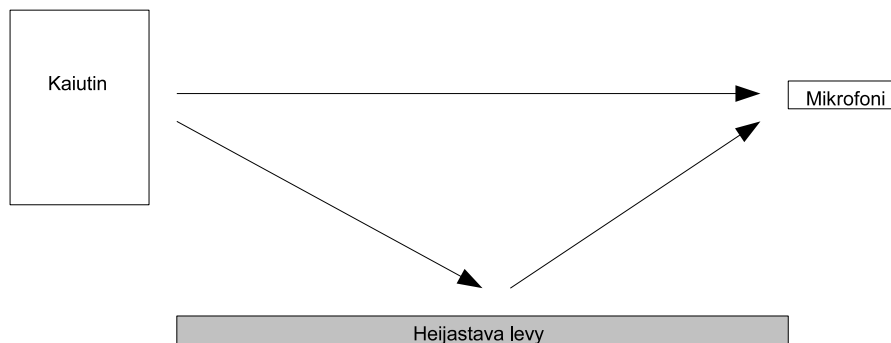
Samalla periaatteella toteutetaan mittaukset 30 ja 60 asteen kulmista. Kuvasta 4.8 nähdään kuinka 60 asteen kulmasta mitattuna korkeat taajuudet 1kHz:stä ylöspäin toistuvat heikommin, eli kaiutin on *suuntaava* suurilla taajuuksilla. Matalilla taajuuksilla kaiutin on luonteeltaan *ympärisäteilevä*. Tämä tarkoittaa, että normaalissa huoneessa korkeat taajuudet toistuvat kuulijalle selkeämmin, kun taas matalat taajuudet tulevat kaikuina ympäri huonetta.



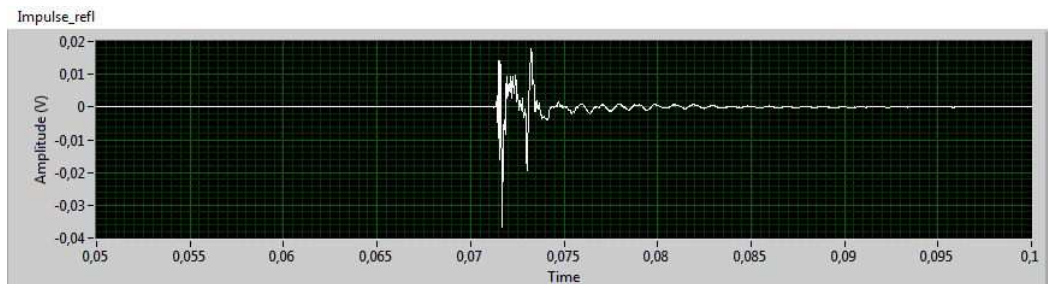
Kuva 4.7: Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta suoraan edestä päin mitattuna



Kuva 4.8: Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta 60 asteen kulmasta mitattuna



Kuva 4.9: Heijastavan levyn tapaus

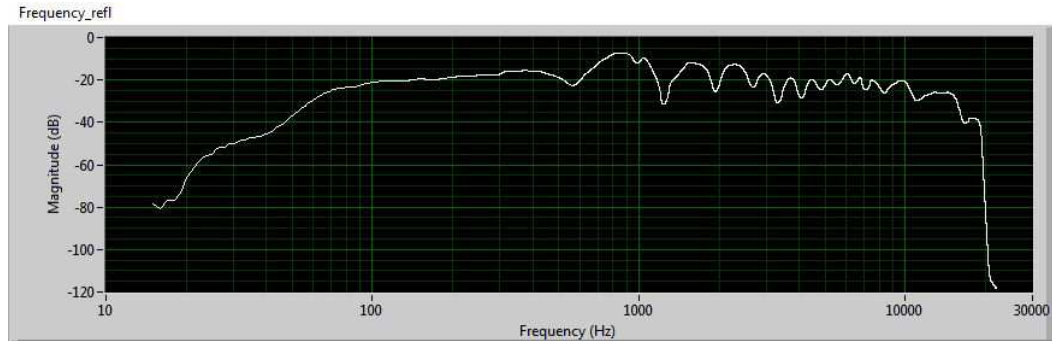


Kuva 4.10: Impulssivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta heijastavan levyn tapauksessa

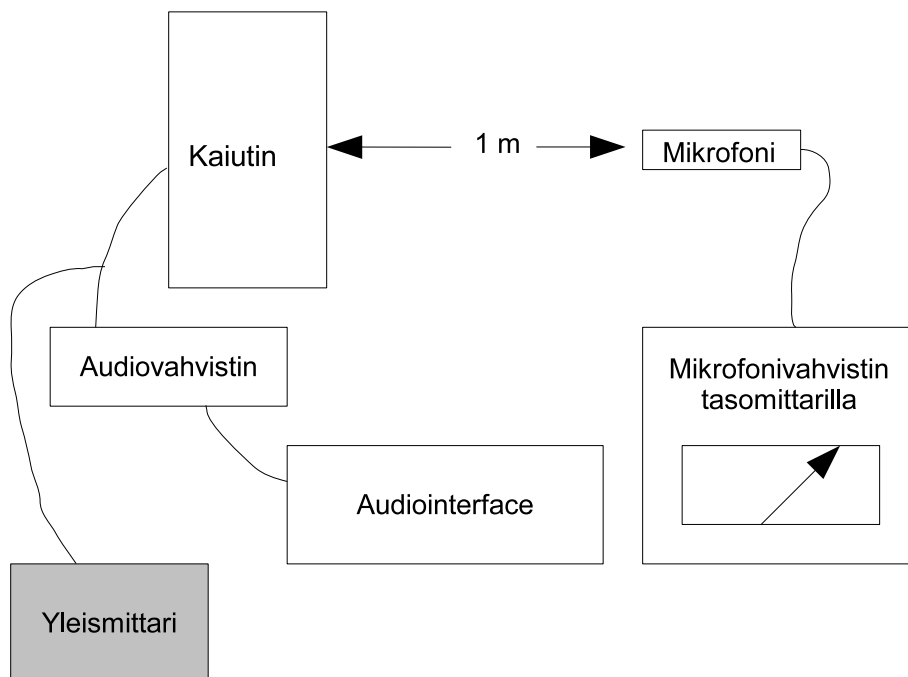
Toinen ja kolmas kysymys liittyvät suuntaavuuteen. Opiskelijaa pyydetään analysoimaan taajuusvasteita, selittämään mistä erot johtuvat ja mitä vaikutuksia tällä on normaalissa ympäristössä.

Heijastavan levyn tapaus kuvassa 4.9 havainnollistaa, kuinka kova pinta vaikuttaa kaiuttimen vasteeseen. Kuvassa 4.10 nähdään mittausohjelman esittämänä impulssivaste heijastavan levyn tapauksessa. Kaiuttimesta suoraan mikrofoniin saapuvan signaalin lisäksi huomataan heijastuksen aiheuttama piikki. Kuvassa 4.11 tämä näkyy magnitudivasteen *kampasuodatinefektinä*. Levystä heijastuneen signaalin ääniaallot joko vahvistavat tai heikentävät tiettyjä taajuuksia aallonpituuden funktiona.

Neljännessä kysymyksessä opiskelijaa pyydetään selittämään impulssivasteen ja taajuusvasteen muutosta heijastavan levyn tapauksessa.



Kuva 4.11: Magnitudivaste Wharfedale Active Diamond Plus -kaiuttimesta heijastavan levyn tapauksessa



Kuva 4.12: Herkkyysmittaukseen käytettävä laitteisto

4.3.5 Herkkyys

Herkkyysmittaus on yksinkertainen, eikä tietokonetta välttämättä tarvita itse mittaukseen. Kaiuttimeen syötetään nimellisesti yhden watin sähköteho taajuudella 1 kHz. 8 ohmin kaiuttimella 1 watti vastaa $2.83 \text{ V}_{\text{RMS}}$ jännitettä (luku 2). 1 W pistetaajuudella on paljon tehoa, joka saattaa vaurioittaa kaiuttimelementtiä. Koska kurssilla ei haluta vahingoittaa mitattavia kaiuttimia, käytetään pistetaajuuden sijaan kaistasuodatettua kohinaa keskitaajuudella 1 kHz.

Kuvassa 4.12 on nähtävissä herkkyysmittaukseen käytetty laitteisto. Tietokoneella generoidaan herätesignaali, mutta itse mittaus tapahtuu yleismittarilla. Opiskelijaa pyydetään laskemaan 1 W tehoa vastaava jännite, jonka jälkeen audiovahvistin säädetään siten, että ulostulojännitteeksi saadaan $2.83 \text{ V}_{\text{RMS}}$. Mikrofonivahvistimessa käytetään vakiovahvistusta, joka tunnetaan. Mikrofonivahvistimen ulostulojännite luetaan vahvistimen näytöltä. Kaiuttimen herkkyys voidaan laskea jakamalla vahvistimen ulostulojännite (V) vahvistuskertoimella ja mikrofonin herkkyydellä (V/dB). Herkkyys ilmoitetaan desibeleissä.

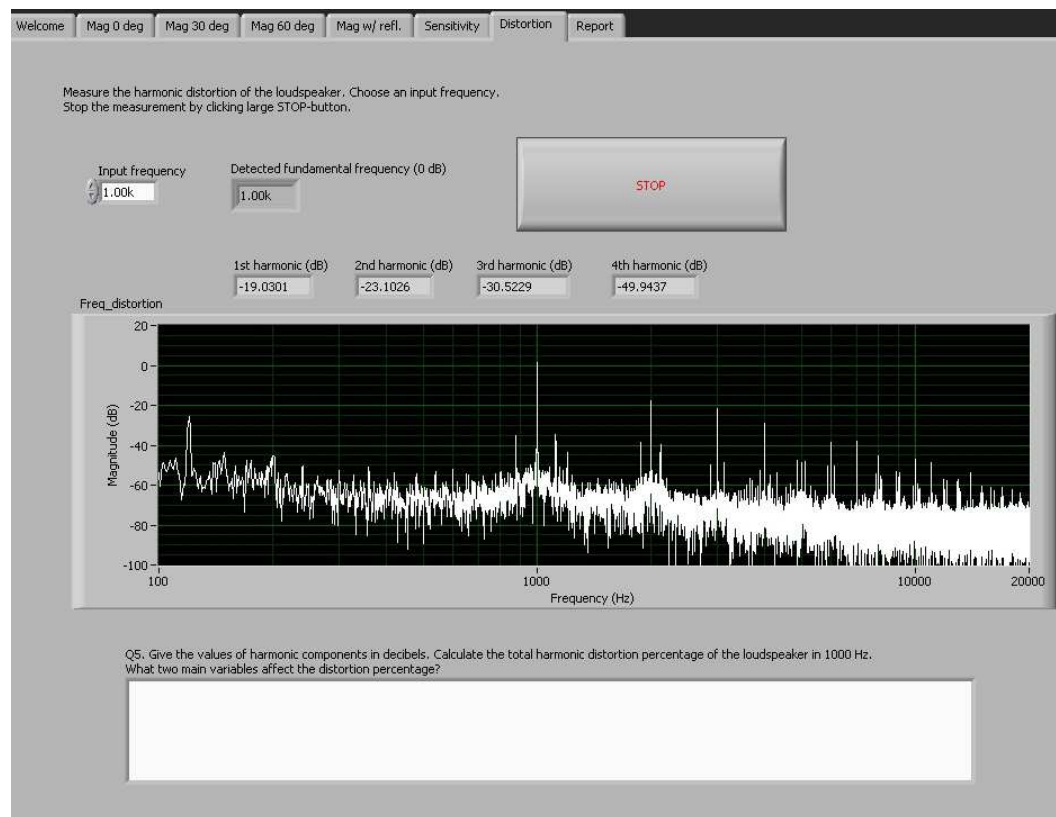
Lopuksi opiskelijalta kysytään käytettyä jännitettä, sekä tulokseksi saatua herkkyyttä.

4.3.6 Kokonaissärö, THD

Kaiuttimen lineaaristen ominaisuuksien testaamisen jälkeen perehdytään kaiuttimen epälineaarisuuksien tutkimiseen. Kokonaissäröprosentti kuvaa kuinka puhtaasti (lineaarisesti) järjestelmä toistaa signaalia. Mitä pienempi säröprosentti, sitä parempi laite on. Säröytymisen alkaa yleensä dynamiikka-alueen tietyn pisteen jälkeen, esimerkiksi silloin, kun kaiuttimen kiinnitykset estävät kaiuttimelementtiä liikkumasta tarpeeksi kauas lepoasennostaan. Signaalin korkeimmat huiput tylppenevät ja signaali *saturoituu*. Kun signaali alkaa saturoitumaan, eli säröytymään järjestelmässä, ulostulon taajuusanalyysissä nähdään uusia taajuuskomponentteja. Nämä aaltomuodon vääristymisestä johtuvat komponentit ovat yleensä harmonisia, eli signaalin perustaajuuksien monikertoja. Perustaajuuden ja monikertojen neliösummien suhteista saadaan laskettua kokonaissäröprosentti (ks. luku 2). Kokonaissärön mittaamiseksi generoidaan siniaalto yhdellä taajuudella. Yleisimmin käytetty taajuus on 1 kHz.

Särömittaustehtävässä opiskelijoiden on tarkoitus asettaa taajuus, jolla säröä mitataan, analysoida särökomponentit ja laskea komponenttien tasoista kokonaissäröprosentti.

Särömittaus toteutetaan virtuaali-instrumentissamme reaaliaikaisena, eli jatkuvana. Kun ohjelma suoritetaan, VI alkaa generoida siniaaltoa ja analysoida äänikortin sisääntuloa samanaikaisesti silmukassa. Sisääntulevalle signaalille tehdään reaaliaikainen Fourier-muunnos, jolloin voimme monitoroida taajuustason esitystä VI:n etupaneelissa. Tämä mahdollistaa sen, että opiskelijat voivat säätää laitteiden vahvistuksia ajon aikana ja nähdä vahvistuksen

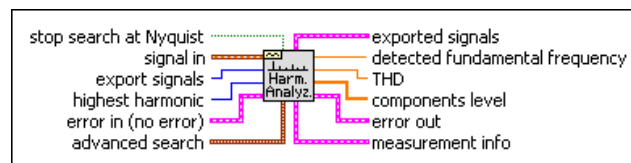


Kuva 4.13: Näkymä särömittauksesta

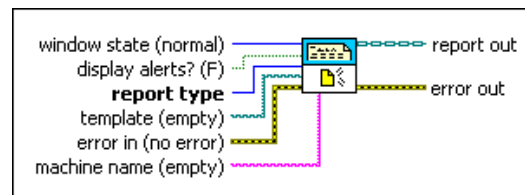
vaikutuksen säröön välittömästi. Näkymä skaalataan selkeyden vuoksi siten, että perustaa-juuden amplitudi toimii 0 dB referenssinä. Kuvasta voisi jo melko hyvällä tarkkuudella lukea harmonisten komponenttien arvot ja laskea kokonaissärön.

LabVIEW:n Sound and Vibrations toolkit sisältää kätevän työkalun harmonisen särön analysointiin (kuva 4.14). Tällä työkalulla saataisiin analysoitua suoraan järjestelmän kokonaissäröprosentti, mutta koska oppilastyössä halutaan opiskelijoiden itse päähkäilevän asioita, käytämme kiertotietä. Saamme harmonisen särön analysoijan avulla selvitettyä signaalin komponentit voltteina. Neljän ensimmäisen särökomponentin arvot muunnetaan dB-asteikolle ja esitetään VI:n käyttöliittymässä, josta opiskelijat voivat kätevästi ottaa ne laskuihinsa.

Kuudennessa kysymyksessä opiskelijaa pyydetään ilmoittamaan särökomponenttien arvot desibeleissä, laskemaan kokonaissäröprosentin ja selittämään mitkä seikat vaikuttavat säröarvoon.



Kuva 4.14: LabVIEW: Harmonic Distortion Analyzer



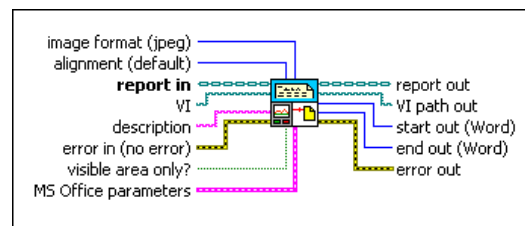
Kuva 4.15: New Report VI

4.3.7 Raportti

Harjoituksen viimeisessä vaiheessa luodaan tehdyistä mittauksista ja kysymyksistä loppuraportti. Sovelluksen viimeinen välilehti pitää sisällään lisäkysymyksiä, jotka liittyvät kurssin aihepiiriin. Ennen VI:n suorittamista opiskelijaa kehoitetaan tarkistamaan viimeisen kerran, että kaikkiin kysymyksiin läpi harjoituksen on vastattu huolellisesti.

LabVIEW:n perusasennus sisältää joukon raportin luomiseen tarkoitettuja työkaluja. Raportin luontiin käytetään *New Report VI*:a (kuva 4.15), jolla määritetään raportin tyyppi. Valittavina on muunmuassa HTML, Word ja Excel -tyypit. Näistä HTML-raportti kuuluu perusasennukseen. Microsoftin tuotteille luotaviin raportteihin tarvitaan erillinen *Report Generation Toolkit*.

Raportti koostetaan kierrättämällä raporttia raportinmuokkaus virtuaali-instrumentilta toiselle. Kukin VI lisää raporttiin esimerkiksi tekstiä (*Append Report Text VI*), kuvia (*Append Image to Report VI*) tai mittareiden etupaneeleita (*Append Front Panel Image to Report VI*). Käyttöliittymässä vastauksille tarkoitettut kentät ovat *String Control* -ohjaimia. Jokainen ohjain on nimetty muuttujaksi ja ohjaimen arvo (opiskelijan kirjoittama vastaus) luetaan muuttujan arvona *Append Report Text VI* -komponentille. Raporttiin kerätään opiskelijoiden tiedot, kysymysten vastaukset, taajuusvasteiden grafiikat ja impulssivaste heijastavan levyn tapauksessa. Lopuksi raportti tallennetaan tiedostoon tai lähetetään tulostimelle. Erään opiskelijaryhmän loppuraportti liitteessä B.



Kuva 4.16: Append Front Panel Image to Report VI

4.4 Työohjeet

Ohjelman käyttöliittymä sisältää pieniä määriä tietoa mittausten kulusta. Tärkeimmät kohdat on tuotu esille, kuten esimerkiksi CEI IEC 268-5 standardin mukaisen taajuusvasteen määritelmä. Yksityiskohtaisemmat ohjeet harjoituksen läpiviemiseksi ja lähdekirjallisuutta löytyy kurssin kotisivuilta, joita voi selailla paperilta tai nettiselaimella mittausten lomassa.

4.5 Tietoturva ja järjestelmän ylläpito

Tietoturvan merkitys tämän päivän tietoyhteiskunnassa on noussut suureen rooliin. Tietomurtoja ja yksityisyyden loukkaamista tapahtuu päivittäin, eikä asiaan voi suhtautua kevyesti. Käytännössä jokainen tietokone on ajateltava mahdollisena hyökkäyksen kohteena. Tietoturva tarkoittaa tiedon ja tietojärjestelmien suojaamista sekä tiedon säilyvyyden ja saatavuuden varmistamista. Tietoon eivät saa päästä käsiksi muut kuin ne, joille tieto kuuluu.

Jokaisen harjoitustyövuoron päätteeksi mittauskoneen kovalevyllä tallentuu opiskelijoiden tekemä raportti. Sovellus generoi opiskelijanumeroista hakemiston, jonka alla kaikki mittaukseen liittyvä data on. Tämä data on luottamuksellista, eli opiskelijan ja opettajan välistä tietoa. Koska käyttöjärjestelmään ei luoda käyttäjätunnuksia jokaista opiskelijaa varten, kaikki data on yhden käyttäjätilin omistuksessa. Tämä aiheuttaa mahdollisen tietoturvariskin. Toinen opiskelija voi esimerkiksi epähuomiossa poistaa aiemman ryhmän mittaustulokset, tai väärinkäyttää tuloksia muokkaamalla niitä tai kopioimalla vastauksia.

Mittauksessa käytettävän hintavan ja herkän laitteiston vuoksi opettaja joutuu olemaan läsnä mittauksia suoritettaessa. Tätä tietoa päätettiin käyttää hyväksi tietojen luottamuksellisuuden käsittelyssä. Kurssin opettajan kanssa sovittiin, että opettaja huolehtii harjoitustyövuoron päätyttyä luottamuksellisen datan oikeaoppisesta jatkokäsittelystä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että opettaja siirtää opiskelijoiden jättämän datan laitoksen palvelimelle kyseiseen käyttöön tarkoitettulle levyalueelle. Tähän löytyy ohjeistus signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitoksen *Laitoskäsikirjasta* [24]. Palvelimella olevien tietojen suojauksesta ja säilyvyydestä huolehtii yksikön ylläpito.

Laitoksen ylläpito huolehtii myös atk-laitteiston tietoturvasta. Ylläpito huolehtii muiden koneiden ohella, että kurssilla käytössä oleva käyttöjärjestelmä ja laitteisto on asianmukaisesti asennettu ja ylläpidetty. Tietoturvapäivityksiä asennetaan säännöllisin väliajoin ja vikaantuneet laitteet vaihdetaan ehjiin tai korjataan. Oppilastyössä käytettävä kone määritellään Aaltoyliopiston työasemapolitiikan mukaan *yleisökäyttöiseksi työasemaksi* [25]. Tämä tarkoittaa sitä, että työasema on sijoitettava omaan yleisökäyttöisten työasemien verkkosegmenttiinsä. Ylläpitotason käyttäjätunnuksia ei jaeta käyttäjille, vaan työasema on työasemapalveluiden tarjoajan, tässä tapauksessa yksikön ylläpidon, keskitetysti ylläpitämä.

Mittauskoneen ylläpidossa on otettava huomioon muutamia erityisiä tekijöitä. Käyttöjärjestelmäpäivityksiä asennettaessa on varmistettava LabVIEW:n version toimivuus uuden järjestelmäversion kanssa. Mikäli käyttöjärjestelmä joudutaan päivittämään versioon, jota LabVIEW:n kyseinen versio ei tue, on myös LV:stä asennettava uudempi versio. Tässä tapauksessa on syytä tarkistaa, että mittauksessa käytettävä sovellus eli virtuaali-instrumentti toimii kaikkine sisältämineen virtuaali-instrumentteineen uuden LabVIEW-kehitysympäristön kanssa.

Käytännössä tämä tarkistustoimenpide olisi syytä tehdä kerran vuodessa. Kokemus vuosien varrella on osoittanut, että jos sovellusta pidetään liian pitkään yhden LabVIEW-version alla, siirtyminen uudempaan versioon ei enää helposti onnistukaan. Tässä päivitysvaiheessa on myös kätevä samalla toteuttaa edellisen vuoden aikana esille tulleet parannusehdotukset ja korjata mahdollisia puutteita. Tällainen järjestely luo sovelluksen kehitykselle luontevan kaaren, eikä ajan hammas pääse niin pahasti tekemään tuhojaan.

Luku 5

Testaus ja huomiot

5.1 Testijärjestely

Ohjelman toimivuus testattiin varsinaisella mittausjärjestelmällä ennen kurssin alkua kurssin opettajan kanssa. Harjoitustyön suoritus käytiin läpi huolellisesti.

Varsinainen testaus tapahtui opiskelijoiden toimesta. Keväällä 2010 kurssin suoritti 24 opiskelijaa. Kurssin aloitusluennolla opiskelijoille esiteltiin ohjelman toiminta ja kerrottiin kyseisen kurssin toimivan testiryhmänä uudelle mittausohjelmalle. Käyttäjäkokemuksia ja palautetta kerättiin sovelluksella itsellään teoriakysymysten joukossa, sekä ETA-tiedekunnan virallisella opetuksen kehittämiseen tarkoitetulla palautejärjestelmällä.

5.2 Huomiot ja palaute

Järjestelmän pystytysvaiheessa huomattiin, että LabVIEW:n installaatiot eroavat toisistaan esimerkiksi 32-bittisen ja 64-bittisen Windows -version välillä. Ohjelman rakennus tapahtui 32-bittisessä Windows XP -koneessa, kun taas oppilastyössä käytetään 64-bittistä Windows Vistaa. Kun virtuaali-instrumenttia siirreltiin koneiden välillä, alkoi ilmetä jotain pieniä käynnistysvaikeuksia, esimerkiksi LV ei löytänyt kaikkia ohjelman sisältämiä komponentteja. Ongelma saatiin kuriin kertomalla LabVIEW:lle missä mikäkin komponentti sijaitsee kyseisessä installaatiossa. Eri alustojen käyttö kehityksessä ja oppilastyössä oli harkittu teko. Tällä tavalla saatiin varmistettua tietynasteinen yhteensopivuus eri järjestelmissä, eikä ajauduttu lopputulokseen, missä ohjelma toimisi vain tietyissä olosuhteissa.

64-bittisen Windows -version asennus oli muutenkin riskialtis valinta. Kovinkaan monen audio-laitevalmistajan tuotteisiin ei päästy käytännössä tutustumaan, eikä täyttä varmuutta ajureiden toiminnasta kyseisessä ympäristössä ollut. Takaporttina toki oli siirtyminen 32-bittiseen versioon koska tahansa, mutta tätä ei tarvinnut kuitenkaan tehdä.

Kurssin opettajan kanssa tehdyssä laitteiston pystytystestissä todettiin PC:n oman äänikortin ongelmallisuus ja päädyttiin käyttämään ulkoista USB-audiointerfacea. Sisäisen äänikortin ajurissa oli todella sekava käyttöliittymä, eikä vaste pysynyt suorana, koska äänikortin ohjelmisto yritti „kiillottaa” kortin soundia lisäämällä sekaan taajuuskorjaimia ja tilamallinnuksia. Edirollin äänikortti toimi moitteetta ja päästiin käsiksi itse mittauksiin. Ohjelma suoriutui mittauksista hyvin ja loppuraportti saatiin tulostettua.

Kurssin aikana Edirollin USB audio interface alkoi reistailla. Tuloliittimessä oli juotos auennut, mikä aiheutti pätkimistä ja äänenlaadun heikkenemistä. Kurssi saatiin kuitenkin viasta huolimatta vietyä loppuun.

Opiskelijoiden antama palaute oli pääasiassa positiivista. Muutamiin käyttöliittymän yksityiskohtiin puututtiin ja parranusehdotuksiakin ilmeni. Valtaosa kritiikistä keskittyi magnitudivasteiden zoomaamiseen, joka oli koettu hieman hankalaksi. Opiskelijoilta saatuja kommentteja esitellään liitteessä C.

5.3 Kehityskohteet

Opiskelijoilta saadun palautteen perusteella selkein kehitettävä asia on vasteiden zoom-toiminnon parantaminen. Osa opiskelijoista toivoi saman näkymän käyttämistä kaikkien vastetulosten esittämiseen.

Grafiikkanäkymän yhteyteen on mahdollista liittää näytön skaalaukseen käytettäviä työkaluja, joiden avulla juuri tietynlaiset zoomaukset ovat nopeampia käyttää. Magnitudivastemittaukset voitaisiin toteuttaa myös siten, että kaikki neljä tapausta olisivat samalla välilehdellä ja tulokset piirtyisivät samaan kuvaan eri väreillä. Välilehdelle toteutettaisiin valitsin, esimerkiksi sisäinen välilehtivalikko, josta valittaisiin magnitudivastemittauksen tapaus (kaiuttimen kulma, heijastavan levyn tapaus), jonka mukaan vasteet tallennetaan sekä ohjeet ja teoriakysymykset esitetään.

Saadun palautteen lisäksi on noussut esille muutamia muita kehitysideoita. Harjoitustyöhön voisi lisätä laitteiston kalibroinnin, jota voitaisiin hyödyntää mittalaitteiden vaikutuksen kompensointiin lopputuloksista. Esimerkiksi mikrofoneille on saatavissa kalibrointi-tiedostoja, joita käyttämällä mikrofonin vaste saadaan vähennettyä kaiuttimen vasteesta.

Suurempaan näytteenottotaajuuteen siirtymiselle ei ole mitään estettä kunnon audio-interfacea käytettäessä. Mittaukset voitaisiin toteuttaa esimerkiksi 96 kHz näytteenottotaajuudella, jolloin mittauksen luotettavuus kaiuttimen vasteen yläpäässä paranisi. Nykyisellä 44.1 kHz taajuudella vastemittaus joudutaan rajoittamaan yläpäästään 20 kHz:iin.

LabVIEW-kehitysympäristön Professional versiossa, joka myös TKK:n lisenssi on, on mahdollista kääntää ohjelmoitu virtuaali-instrumentti suorittavaksi .exe tiedostoksi. Tätä käytetään esimerkiksi silloin, kun asiakkaalle tehdään mittaussovellus LabVIEW:llä, eikä

ole tarkoituksenmukaista, että asiakas itse joutuu ostamaan LabVIEW:n lisenssin käyttäkseen sovellusta. Tämä vähentäisi entisestään mittauskoneen ylläpidollista työmäärää ja helpottaisi uuden koneen käyttöönottoa, mikäli vanha menee rikki.

Luku 6

Yhteenveto

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin opetusohjelma akustisen mittauksen opetukseen. Vaihtoehtoisia toteutustapoja käytiin läpi erinäköisten ohjelmien yhdistelmistä aina suurempiin kehitysympäristöihin asti. Työn aikana perehdyttiin useisiin ohjelmiin ja käsiteltiin niiden ominaisuuksia ongelman ratkaisemiseksi. Valintaa tehdessä kriteereinä käytettiin opiskelijan, opettajan ja laitoksen infrastruktuurin, eli tässä tapauksessa ylläpidon, näkökulmia asiaan. Ratkaisuksi löysimme LabVIEW-kehitysympäristön, jolla mittausautomaation ohjelmointi graafisine käyttöliittymineen on kohtalaisen helppoa. Lisäksi LabVIEW:n lisenssi on laitoksella käytettävissä valmiiksi eli lisäkustannuksia ei sitä kautta syntynyt.

LabVIEW:n avulla toteutettiin havainnollinen käyttäjärajapinta oppilastyöhön. Virtuaali-instrumenteiksi kutsuttavien sovellusten tunnusmerkkinä on fyysisen laitteen ulkonäköä muistuttava käyttöliittymä. Toiminnallisuus mittausohjelmaan ohjelmoitiin LabVIEW:n monipuolista komponenttikirjastoa apuna käyttäen, välillä valmiisiin funktioihin nojaten, toisinaan erilliskomponenteista itse ohjelmoiden. Tämä todettiin olevan nimenomaan yksi LV:n vahvuuksista. Useimpiin ongelmiin ja tehtäviin löytyy valmiita ratkaisuja, mutta yksityiskohtaisen räätälöinnin mahdollisuus on kuitenkin koko ajan olemassa. Opetuskäyttöön laadittavaan ohjelmaan on tärkeää saada sisällytettyä opetuksellista aineistoa ja arvostelun kannalta välttämättömiä tehtäviä. Arvostelua varten tarvitaan myös loppuraportti. Nämä toiminnot saatiin toteutettua ohjelmaan, ilman että mittausohjelman käytettävyyks kärsi.

Kurssin S-89.3330 Akustisen mittauksen harjoitustyö aloitusluento keväällä 2010 pidettiin 20. tammikuuta. Työ saatiin valmiiksi ajoissa ennen kurssin alkua. Ohjelma esiteltiin avausluennolla ja toiminnasta pidettiin pieni demonstraatio. Mittaukset suoritettiin helmikuun aikana TKK:n isossa kaiuttomassa huoneessa. Kurssin aikana ei ilmennyt ongelmia itse sovelluksen kanssa ja kurssi saatiin kunnialla läpivietyä. Opiskelijoiden antama palaute oli pääosin positiivista, ainoastaan pieniä parannusehdotuksia tuli ilmi.

6.1 Ratkaisun yleispätevyys

Opetusohjelman puuttuminen harjoitustyökurseilta on yleinen ongelma. Vastaavanlaisia ratkaisuja voidaan helposti kehittää LabVIEW-ohjelman avulla myös muille kursseille. Virtuaali-instrumentteihin saa yhdistettyä melkein mitä tahansa ohjelmointikieltä tai -ympäristöä, jolloin mahdollisuudet ovat rajattomat. Tämä diplomityö toimii eräänlaisena esimerkkinä, kuinka opetusohjelmaa voidaan lähteä toteuttamaan ja mitä ongelmia todennäköisesti tulee vastaan. Työssä otettiin huomioon myös tietoturvaseikkoja, joita ei sovi unohtaa nykyään, kun tietoturva ja yksilönsuoja ovat suuressa roolissa. Ohjelman kehitys ei myöskään lopu siihen, kun valmis ohjelma on otettu käyttöön. Tarvitaan sitoutuneisuutta ohjelman kehittäjältä tai järjestelmää ylläpitävältä taholta, jotta ohjelman käyttöikä ei jää suunniteltua lyhyemmäksi. Säännölliset päivitykset, parannukset ja tarkistustoimenpiteet muuttuvien alustojen kanssa ovat välttämättömiä. LabVIEW:llä kehitetyllä sovelluksella voi oikein ylläpidettynä olla hyvinkin pitkä elinkaari.

Tämä työ myös mahdollisesti raottaa ovea akustiikan tutkijoille Aalto-yliopiston Teknillisessä korkeakoulussa LabVIEW:n mahdollisuuksista sekä akustisten mittausten suunnittelussa ja toteutuksessa että signaalinkäsittelyalgoritmien reaaliaikaisessa testauksessa. LabVIEW:n käytön yleistymisen muun muassa loisi pohjaa laitoksen yhtenäisemmälle ohjelmistopoliitikalle.

Kirjallisuutta

- [1] Tapio Lahti. Akustinen mittaustekniikka. Technical Report 38, Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, 1995.
- [2] Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*. Addison-Wesley Publishing Company, 2nd edition, 1990.
- [3] National Instruments. LabVIEW, April 2010. <http://www.ni.com/labview/>.
- [4] Sanjit K. Mitra. *Digital Signal Processing*. Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara, 2nd edition, 2002.
- [5] Martin Colloms. *High Performance Loudspeakers*, volume 1. Pentech Press, 4th edition, 1991.
- [6] Floyd E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preference: Part 1. *J. of the Audio Engineering Society*, 34, Apr 1986.
- [7] Floyd E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preference: Part 2. *J. of the Audio Engineering Society*, 34, May 1986.
- [8] F. Alton Everest. *Master Handbook of Acoustics*. Addison-Wesley Publishing Company, 4th edition, 1990.
- [9] Wolfgang Klippel. Loudspeaker nonlinearities - causes, parameters, symptoms. *J. of the Audio Engineering Society*, 54, Oct 2006.
- [10] Ila Tokola. Computer Based Education of Acoustical Measurements. Master's thesis, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1999.
- [11] Jussi Pekonen. S-89.3330 akustisen mittauksen harjoitustyö, kurssin läpivienti ja palaute vuosina 2008 ja 2009, 2010.
- [12] Morset Sound Development. WinMLS, April 2010. <http://www.winmls.com/>.

- [13] SuperMegaUltraGroovy. FuzzMeasure, April 2010. <http://supermegaultragroovy.com/products/FuzzMeasure/>.
- [14] OpenSource community. Homepage of OpenSource organization, April 2010. <http://www.opensource.org>.
- [15] SourceForge. Audacity, April 2010. <http://audacity.sourceforge.net/>.
- [16] Audio Precision Inc. Audio precision, April 2010. <http://ap.com/>.
- [17] The MathWorks Inc. MATLAB, April 2010. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [18] Audio AG. RME, April 2010. <http://www.rme-audio.de/>.
- [19] Apple. MacOS, March 2010. <http://www.apple.com/mac/>.
- [20] Microsoft. Windows, March 2010. <http://windows.microsoft.com/>.
- [21] CentOS Project. CentOS, April 2010. <http://centos.org/>.
- [22] GNU General Public License. RPM package manager, April 2010. <http://rpm.org/>.
- [23] Roland. Edirol, April 2010. <http://www.rolandus.com>.
- [24] Martti Rahkila. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos - Laitoskäsikirja, 2010. Versio 1.2.
- [25] Tietohallinnon johtoryhmä. Aalto-yliopiston työasemapolitiikka, 2009.

Liite A

Kysymykset

1. What is the frequency range of this loudspeaker according to CEI IEC 268-5? Is there any other way to define the frequency range of this loudspeaker?
2. How did the free field response change? Can you give any reasons for the change? What is the meaning of this change in a normal room?
3. How should the response change as a function of angle in a dynamic loudspeaker? Are there any advantages or drawbacks if the response changes with the angle?
4. What happened to the impulse response and why? How would you explain the comb filter effect of the magnitude response?
5. What is the calculated value of the voltage that should be fed to the loudspeaker? What is the sensitivity of the loudspeaker measured with 1W@1m?
6. Give the values of harmonic components in decibels. Calculate the total harmonic distortion percentage of the loudspeaker in 1000 Hz. What two main variables affect the distortion percentage?
7. What do we know about the audible sound quality of the loudspeaker based on these measurements? How can we justify that the results describe just the loudspeaker and not the whole system?
8. Give the name and model of the loudspeaker measured. Describe briefly the type of the loudspeaker you were measuring (size, cabinet type, number of drive units etc.). How would you classify this particular loudspeaker? Do you think this is a good or a bad one and why?
9. Take the RadioShack sound pressure level meter (as the course personnel) and go to both the cafeteria and the ETA-library. Measure the sound pressure level in both

places using A-weighting and slow response time. Test other settings too. How did the choice of the frequency weighting and the response time affect the results and why?

10. Did you notice some particular things worth mentioning during the measurements? Give also feedback for this program, what was good and what needs to be improved. You can also give feedback for the measurements, equipment and things related to this tutorial work.

* According to the International Standard CEI IEC 268-5 the effective frequency range of a loudspeaker is the range of frequencies, bounded by the upper and lower limits, for which the frequency response of the loudspeaker is not more than 10 dB below the sound pressure level averaged over a bandwidth of one octave in the region of maximum sensitivity. Sharp troughs in the response curve narrower than 1/9 octave at -10 dB level shall be neglected in determining the frequency limits.

Liite B

Mittausraportti

Erään opiskelijaryhmän tulostama loppuraportti. Opiskelijoiden nimet ja opintokirjannumerot muutettu.

S-89.3330 measurement exercise report

15.2.2010

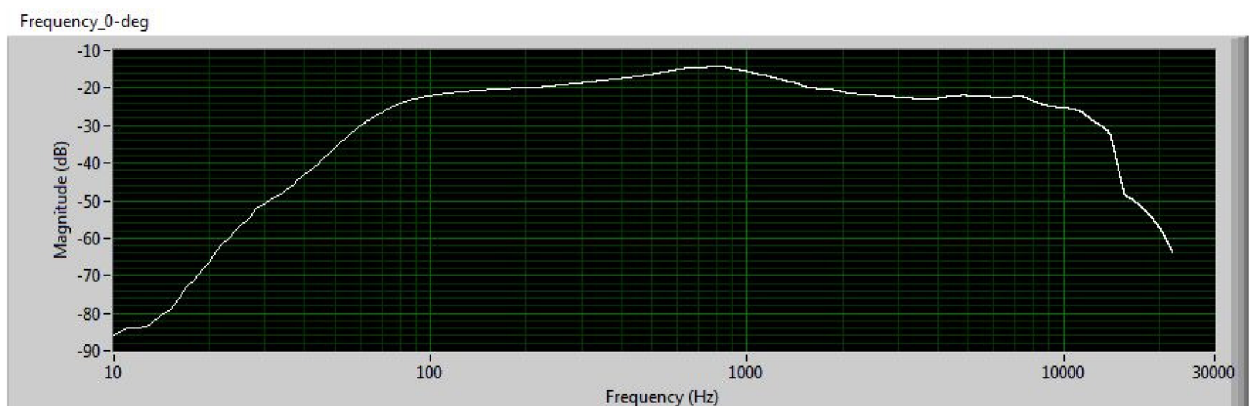
14:55

Teemu Teekkari 99999X

Mikko Malli 88888Y

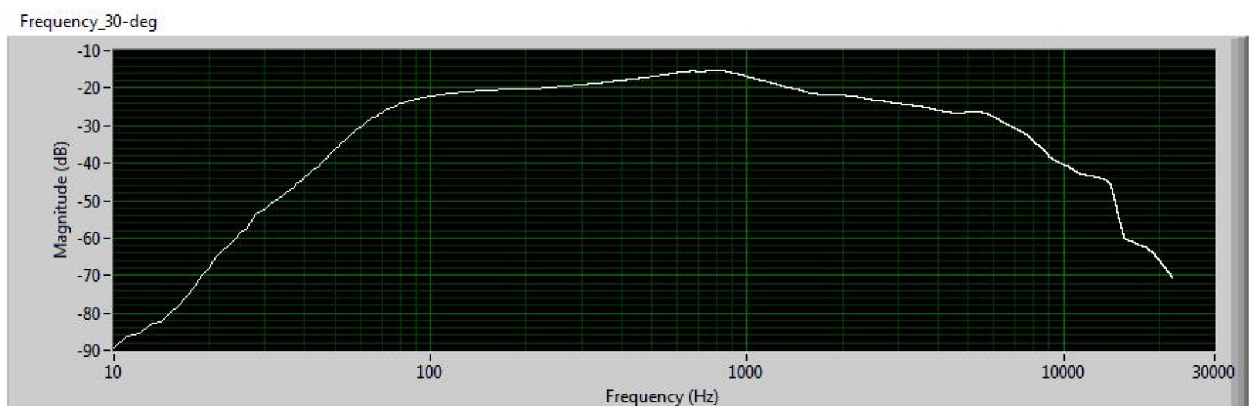
Q1

80 Hz - 8300 Hz. Toinen tapa on katsoa taajuusvaste -6 dB maksimista.



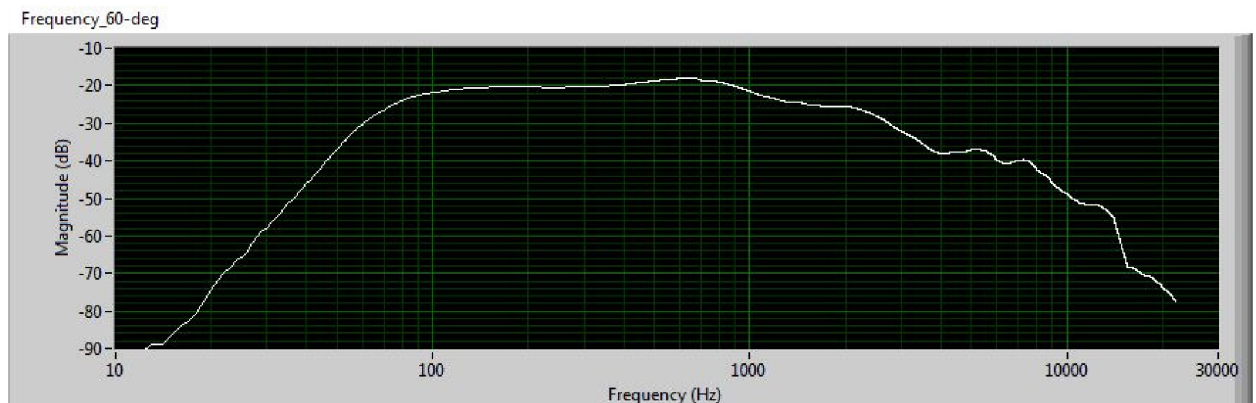
Q2

Diskantit alkavat vaimeta jo noin 2000 Hz kohdalla. Muutos johtuu siitä, että kaiuttimen suuntaavuus vaikuttaa eniten korkeisiin ääniin. Tavallisessa huoneessa taajuusvaste vääristyy samalla tavalla.



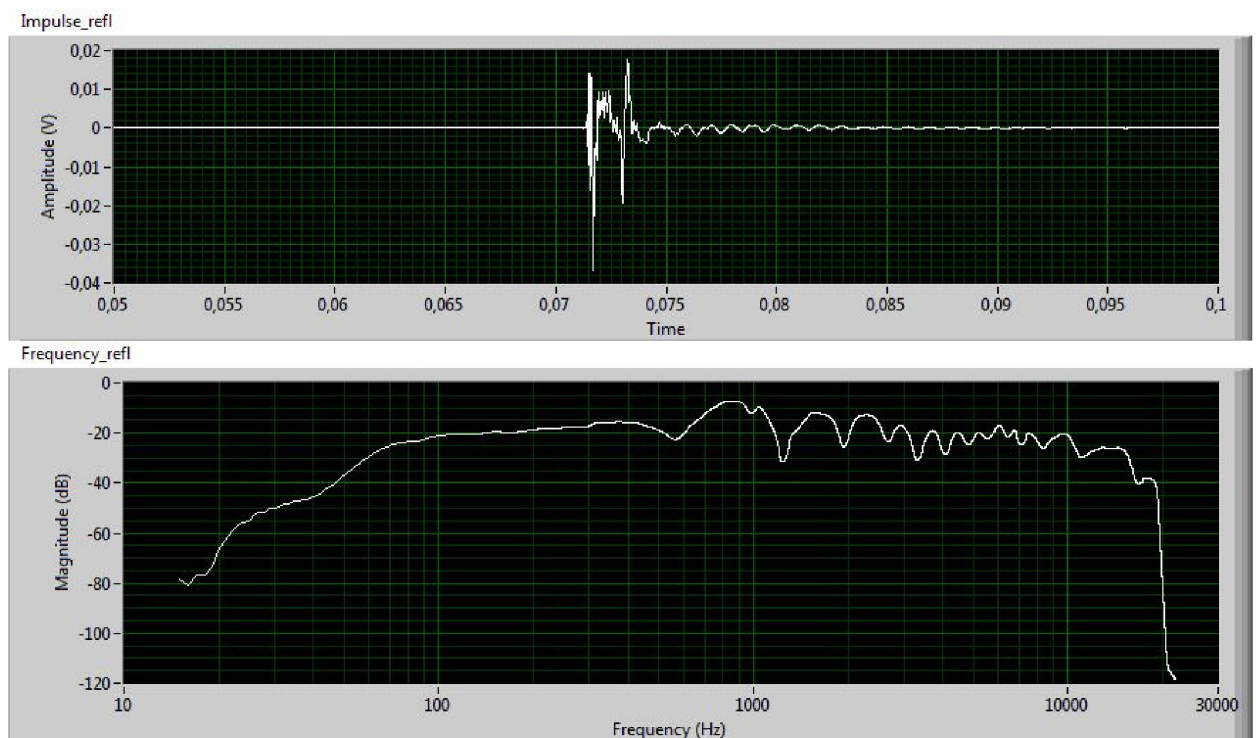
Q3

Matalat ja korkeat taajuudet vaimenevat kulman kasvaessa. Korkeilla taajuuksilla vaimeneminen on nopeampaa kuin matalilla. Jos on liian terävä diskantti niin sitä saa vaimennettua kulmaa muuttamalla.



Q4

Impulssivasteessa näkyy levyn aiheuttamat heijastukset ja niiden amplitudi on suurempi kuin suoran impulssin. Jälkikaiunta-aika pitenee. Levyn aiheuttamat ylimääräiset heijastukset vahvistavat joitain taajuuksia ja heikentävät toisia. Tämä näkyy taajuusvasteessa kampsuodinefektinä (päästökaistalla on vaimentumia ja korostumia).



Q5

$P = U \cdot I$, $U = RI \Rightarrow P = U^2/R \Rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1 \cdot 8} = 2,83 \text{ V}$
 Herkkyys on 87.5 dB

Q6

1. -25,0829 dB = 0,00310 W, 2. -44,581 dB = $3,483 \cdot 10^{-5}$ W, 3. -57,3755 dB = $1,83 \cdot 10^{-6}$ W, 4. -59,4194 dB = $1,143 \cdot 10^{-6}$ W, $P_1 = 1 \text{ W}$ (lähtöteho)
 $\text{THD} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5)/P_1 = 0,31 \%$

Q7

Taajuusvaste on kohtalaisen tasainen keskiäänillä. Bassotoisto on heikkoa ja diskantit hieman vaimentuneita. Kaiuttimen suuntaavuus on kelvollinen. Mittaukset eivät kuitenkaan kerro koko totuutta kaiuttimen äänenlaadusta. Äänentoistojärjestelmässä on kuitenkin monta muutakin komponenttia, kuten vahvistimet, kuuntelutila, varsinainen äänilähde.

Q8

Wharfedale Active Diamond Plus. 110mm paperi basso-/keskiäänielementti ja 20mm muovinen diskanttielementti. Tilavuus 5.2 dm³. Refleksikotelo.

Kaiutin on keskitasoa. Elementit eivät ole tehty kovin laadukkaista materiaaleista.

Q9

Ruokalan keittiössä tiskikoneen vieressä sen ollessa päällä, äänenpainetaso oli noin 75 dB(A). Kirjaston lukuhuoneessa A-painotuksella ei näkynyt mitään, C-painotuksella taso oli noin 52 dB.

C-painotuksella äänenpainetaso nousi A:han verrattuna, koska se ottaa huomioon matalataajuisia signaaleja. Vasteaika ei merkittävästi vaikuttanut mittauksiin.

Q10

Kuvaajien zoomaus voisi tapahtua valitsemalla hiirellä zoomattava alue, kuten esimerkiksi matlabissa. Muuten hyvä ohjelma. Itse mittaukset olivat hyviä ja mielenkiintoisia. Labrassa oppi uusia asioita.

Liite C

Opiskelijoiden antamaa palautetta mittausohjelmasta

- „Ohjelma on muuten ok, mutta voisi joko muistaa tehdyn skaalausasetuksen edellisestä välilehdestä tai skaalata hieman tiukemmaksi asteikkoja jo valmiiksi. Näin kaiuttimia mitattaessa saataisiin näkyviin mielenkiintoinen alue nopeammin. Ohjelma voisi antaa ohjeen heijastavan tason mittauksen kohdalla tason laittamisesta, jotta mittaus olisi helpompi toteuttaa omin avuin. Herkkyysmittauksessa myös olisi hyödyllistä, jos ohjelma muistuttaisi siirrosta metrin etäisyydelle tai kysyisi miten 2m etäisyyden tulos muutettaisiin metrin päästä mitatuksi.”
- „The measurment exercise seemed good, it's nice to get a little hands on experience on how these measurments actually are done. Some minor points on the actual program: The scaling of the axes should reveal more lines when zooming. Also cursor movement could show the measurement values in the graph.”
- „Zooming the impulse and magnitude response windows was frustrating. When changing the frequency axis, the dB axis went to the orginal state and viceversa.,,
- „Kuvaajien zoomaus voisi tapahtua valitsemalla hiirellä zoomattava alue, kuten esimerkiksi matlabissa. Muuten hyvä ohjelma. Itse mittaukset olivat hyviä ja mielenkiintoisia.”
- „Hyvin näytti ohjelma toimivan. Ei valittamista.”
- „Taajuusvastegraafin automaattiskaalaus aiheutti ylimääräistä työtä.”
- „Magnitudivasteet voisi lisäksi laittaa katsottavaksi samasta kuvasta. Ohjelma on muuten hyvin yksinkertainen varsinkin kun asetukset on valmiiksi määritetty mittaajia

varten.”

- *„Ohjelmaan parannusta toisi, jos cursorin alla olevan arvon saisi näkyviin. Lisäksi akseleiden automaattiset skaalaukset tuntuivat hassuilta.”*